

LOS PROBLEMAS DE LA CIENCIA

Discurso del Académico Electo

Dr. D. ENRIQUE MELÉNDEZ HEVIA

En el acto de su recepción el día 23 de noviembre de 1998

DISCURSO DE CONTESTACIÓN

por el Académico Numerario

Ilmo. Sr. Dr. ÁNGEL GUTIÉRREZ NAVARRO

LOS PROBLEMAS DE LA CIENCIA*

Enrique Meléndez Hevia

Excmo. Sr. Rector Magfco,

Excmo. Sr. Presidente,

Excmos e Illmos. Señores.,

Señoras y Señores.

Este es para mi un momento de gran satisfacción, y sólo puedo decir para agradecer vuestra distinción al haberme elegido académico de número de la Academia Canaria de Ciencias, que yo desearía que también lo fuese para vosotros. Os aseguro que haré todo lo posible para ello, pero dependo de vuestra comprensión. Lo único que puedo prometeros es mi enorme ilusión por la ciencia, mi trabajo y mis ideas, mi amistad, y un gran deseo de seguir aprendiendo de todos los maestros que nos han precedido en estos podios.

Deseo hablar de *Los problemas de la ciencia*. He elegido este tema porque lo considero de la máxima importancia, muy actual, y porque al ser general creo que será de más interés para todos. Daré una versión personal de la ciencia, de su desarrollo y de su relación con la sociedad.

Quizá pueda sorprender esta elección, pues se podría pensar que ya está dicho todo en este campo, y que voy a repetir cosas ya sabidas y trilladas. Pero no será así. No creo que sobre este tema se haya escrito mucho, y lo que hay se lee y se comenta poco. Por lo general, estas cuestiones tan trascendentes no existen en los planes de estudios, ni en los libros de texto, ni en las lecciones magistrales en clase, y las obras de quienes se han ocupado de él no suelen ser tema corriente de conversación entre los científicos, ni entre los estudiantes de las carreras de ciencias, y eso no debería ser así. Además pienso que aún queda mucho por decir. Y creo que yo puedo aportar algo nuevo a esta discusión. Mi necesidad de divulgar mis pensamientos y pensar que ello podría ayudarnos a todos es lo que me impulsó a escribir todo esto.

No se me oculta que éste es un tema polémico, que puede incluso ser *muy polémico* en algunas partes; pero creo que si es así, lo es porque lo son la ciencia y su repercusión social. Por desgracia, las interacciones entre la ciencia y la política generan problemas que los que nos dedicamos a la ciencia sufrimos más que los que se dedican a la política. Por

* Texto del discurso pronunciado por el autor en el acto de su recepción como miembro de la Academia Canaria de Ciencias, el día 23 de Noviembre, de 1998.

eso, hablar de esto les interesa más a los científicos, pero yo desearía que también lo escuchasen los políticos.

Vuestra presencia en este acto me conmueve y deseo aprovechar esta ocasión para agradecer a todos que me honráis con vuestra presencia, desde las máximas autoridades académicas hasta los alumnos, vuestra ayuda para desempeñar una labor científica de la que vengo a dar cuenta. A mis buenos amigos, el Profesor Nácere Hayek, en representación de esta Academia, la confianza demostrada en mí al elegirme para ocupar este sillón, y al Profesor Angel Gutiérrez Navarro, su amabilidad por estudiar este discurso para hacer la contestación pertinente. ¡Qué triste sería hablar sin que alguien contestase...! Ojalá podamos seguir todos en el futuro este debate que él iniciará y que le agradezco con toda sinceridad.

He dividido esta disertación en dos partes. En primer lugar haré unas consideraciones generales sobre la ciencia, su método y su desarrollo, y luego expondré lo que he llamado *Los problemas de la ciencia*, que da título a todo este discurso.

Primera parte.

La ciencia, y su método

La ciencia es el conocimiento sistematizado de la Naturaleza, y su búsqueda. No es, pues, una posición estática sino una actividad progresiva del quehacer humano para aumentar el conocimiento, y el camino para alcanzar ese fin, constituye el *método científico*.

El método científico es un procedimiento tan característico de la ciencia que es lo que en realidad la define. Así, la mejor definición de ciencia que puede darse es: toda labor de investigación para aumentar nuestro conocimiento de la Naturaleza, que sigue el método científico. La ciencia se identifica tanto con su método que es obligado ante cualquier descubrimiento preguntar cómo se ha sabido, pues un dato científico es inseparable del método con el que se ha obtenido. Al relatar un resultado, un buen científico siempre tratará de explicar, aunque sea sucintamente, el método que se siguió para saberlo.

El método científico consta de dos partes, como está representado en la figura 1: (a) la recopilación de datos empíricos reproducibles y verificables; (b) la ordenación sistemática y jerárquica de esos datos, y la abstracción de la información que representan, para construir una teoría. Una teoría científica es un conjunto de proposiciones lógicas, consistentes, capaces de explicar los datos empíricos, pero además de esto, el posterior desarrollo de la teoría ha de ser capaz de producir datos que aún no se han obtenido empíricamente, es decir, una teoría científica debe ser capaz de hacer predicciones.

El método científico consiste en aplicar sucesivamente y reiteradamente estas dos partes, dando vueltas a esta rueda—que deberíamos llamar la *rueda general del conocimiento*, hasta que la concordancia entre la teoría y la realidad sea lo más ajustada posible. Esto lleva inevitablemente a ampliar más el campo, y así el conocimiento se extiende; a profundizar más—el conocimiento se hace más básico—y a afianzarlo con más pruebas (se hace más riguroso) [1].

El proceso siempre empieza por la recopilación de datos empíricos, pues sería inútil formular teorías que no estuvieran basadas en datos reales; esta actividad puede hacerse por dos procedimientos: por observación directa de los fenómenos de la Naturaleza, o—cuando éstos son muy complejos—mediante experimentos en el laboratorio, que son modelos simplificados de algún aspecto del fenómeno, donde se controlan las variables externas; pero esta recopilación debe ser de tal forma que siempre los datos recogidos deben ser reproducibles, es decir que el observador pueda repetir la medida cuando se repite el fenómeno en las mismas condiciones, obteniendo el mismo resultado, dentro de un margen aceptable de error, y verificables, esto es, que el mismo resultado pueda ser obtenido por otro investigador usando el mismo método u otro método diferente. En este punto la ciencia es aún muy incipiente; no hay teorías que expliquen por qué las cosas son así, no se dispone de un esquema formal que relacione unos datos con otros, pero ya empieza

El método científico

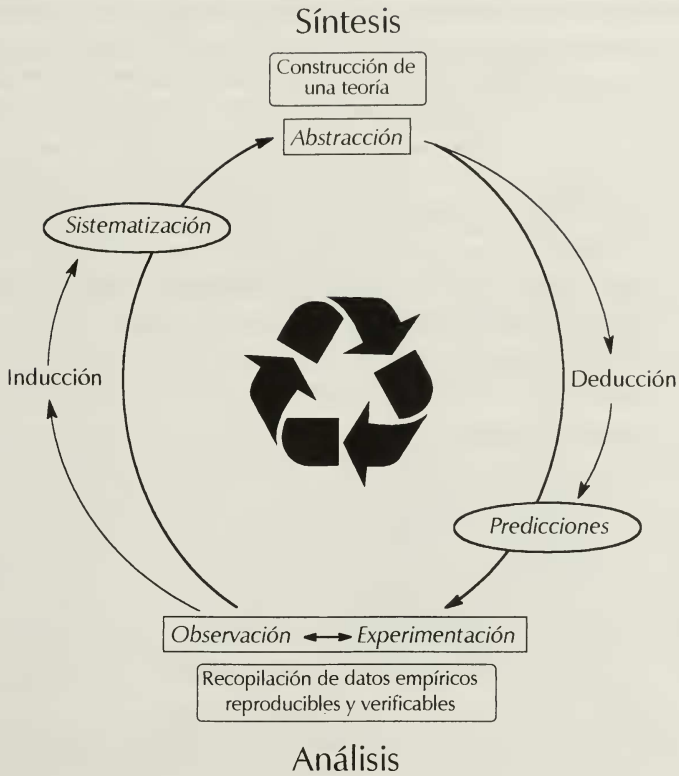


Figura 1. Esquema del método científico.—Una interacción continua entre la abstracción teórica y la comprobación empírica. La filosofía se diferencia de este proceder en que no busca la comprobación empírica de sus conclusiones abstractas, haciéndose totalmente especulativa.

a ser ciencia desde el momento en que es capaz de demostrar que un fenómeno se repite tantas veces como uno quiera cuando se dan las mismas condiciones.

Ahora podemos abordar problemas difíciles de clasificación que servirán para ilustrar los conceptos. Está claro que disciplinas como la biología, la bioquímica, la medicina, la química analítica, o la física cuántica, son ciencias bien caracterizadas; analicemos, pues, casos más difíciles: por ejemplo, ¿es una ciencia la paleontología? Y si la respuesta es positiva, ¿lo es en consecuencia también la historia? ¿Por qué ciertas actividades como la astrología, no son ciencias? Es fácil responder a estas preguntas basándose en las definiciones anteriores y en el esquema de la figura 1.

Como hemos visto, el primer paso en la construcción de una ciencia es la recopilación de datos empíricos y en eso no le exigimos que utilice éste o aquél procedimiento para obtenerlos, de manera que el que la paleontología no sea una ciencia *experimental*, en el sentido más estricto de la palabra no la deja excluida. En efecto, los datos recogidos por la paleontología son reproducibles, porque la historia de la vida ha seguido unas leyes. Esas leyes pueden haber sido ser más o menos complejas, pero se han dado, y la prueba es que no hay contradicciones entre los datos paleontológicos, como no los hay entre los datos bioquímicos o de cualquier otra disciplina científica; los datos recopilados por la paleontología son, pues, reproducibles, y también son verificables, pues los resultados pueden confirmarse por otros paleontólogos estudiando el mismo material u otro diferente.

A partir de aquí los paleontólogos construyen una teoría y pueden predecir cómo serán ciertos fósiles aún no encontrados. Así, mucho del material fósil que se encuentra, se consigue como consecuencia de una búsqueda deliberada en el sitio predicho por la teoría [2].

Todo esto, sin embargo, no ocurre con la astrología, la parapsicología, o con cualquier otra actividad esotérica, ninguna de las cuales ha sido capaz de mostrar jamás un solo fenómeno reproducible ni verificable. El caso de la historia es complicado pues, al contrario de lo que hemos visto en la paleontología, la historia de la humanidad no ha seguido unas reglas fijas; la historia de los pueblos ha sido, por desgracia, completamente arbitraria. Además, y para empeorar las cosas, la historia está llena de falsedades y engaños, documentos y pruebas falsas, etc. En general, la actividad humana se distingue de la actividad de la Naturaleza en que ésta no genera embustes. Por esta razón, muchos datos que puede uno encontrarse en la investigación histórica no son reproducibles, pues uno puede encontrarse con datos contradictorios. La historia tiene difícil su paso por este test. No estoy afirmando que la historia no sea una ciencia, pero, desde luego, su formalización es mucho más difícil, porque tiene que vencer todos esos escollos cuya existencia es inherente a la propia historia. Es más pertinente preguntarse en cada caso: ¿es posible investigar tal hecho histórico científicamente?

La historia sólo se distingue de la paleontología estrictamente en que ésta forma parte de la investigación de la Naturaleza, mientras que aquella investiga las acciones de la humanidad. Sin embargo, esa diferencia es demasiado sutil para insistir en ella, pues ¿es lícito considerar la acción del hombre ajena a la acción de la Naturaleza? ¿Deberíamos considerar que el hombre está excluido de la Naturaleza? Esta cuestión es muy polémica y nos aleja de nuestro propósito, de manera que la pasaré por alto. Prefiero insistir en la diferencia apuntada arriba: la investigación histórica es más difícil porque su camino está lleno de obstáculos y pistas falsas, y lo que debe plantearse el historiador en cada caso es revisar si cada hecho histórico puede ser investigado y demostrado científicamente.

La actividad científica es la continua interacción entre el empirismo y la teoría. Un buen científico no es, pues, un *experimentalista* o un *teórico*; debe ser ambas cosas. Cuando está en el laboratorio debe pensar en la teoría, pues o está tratando de comprobar las predicciones teóricas, o está tratando de aportar los datos que necesita para construir la teoría. Y cuando está en el despacho teórico, con papel y lápiz, debe estar pensando en los experi-

mentos, pues de nada sirve hacer teorías que no se puedan probar en el laboratorio, y que no estén basadas en datos empíricos.

Ciencia y filosofía

En el XVIII Congreso Nacional de la Sociedad Española de ciencias Fisiológicas, (Valencia, 1979), Hans Krebs, uno de los bioquímicos más importantes de este siglo, habló en la conferencia plenaria inaugural "Acerca de cómo formularse preguntas adecuadas en investigación científica" [3]. El texto de esta conferencia debería estar en un sitio de honor en todas las bibliotecas de ciencias, no sólo en las de bioquímica o fisiología. Las ideas de Krebs son tan educativas que debo reproducir aquí algunas frases:

"Toda investigación científica empieza con una pregunta, y por lo tanto es de la mayor importancia que el investigador aprenda a formularse preguntas adecuadas. Esto ha sido expresado frecuentemente; por ejemplo por Claude Bernard, en 1875, en su *Introducción al estudio de la medicina experimental* y más recientemente por Lehninger. Una de las características de una pregunta adecuada es que puedan dársele respuestas interesantes con los métodos disponibles. Cuestiones hay millares, pero cuestiones que puedan ser resueltas y que valga la pena resolver son mucho menos numerosas. Como dijo Medawar: "*La investigación es el arte de lo solucionable*", parafraseando la frase de Bismarck, "*La política es el arte de lo posible*".

Estas reflexiones de Krebs son un buen criterio para distinguir la ciencia de lo que no lo es: una pregunta científica es una pregunta que además de ser interesante, porque contestarla produciría un avance significativo en nuestro conocimiento, tiene que ser posible de contestar con los medios disponibles del método científico. Por ejemplo, la pregunta ¿existe Dios? es, desde luego, muy interesante, pero no es una pregunta científica, sino filosófica, porque uno no puede contestarla aplicando el método científico. La diferencia entre una pregunta científica y una filosófica es que la primera puede contestarse mientras que la segunda no pasa de ser una pregunta. Lo cierto es que la filosofía, al contrario que la ciencia, es más una fuente de problemas y de discusiones estériles, que de soluciones. Una discusión filosófica no tiene término, y cuanto más se insiste en ella produce más discrepancias y nuevas divisiones de tendencias; al contrario, al contestar una pregunta científicamente se cierra una fase, produciéndose un avance neto en el conocimiento. Como dijo Bertrand Russell, ciencia es lo que sabemos y filosofía lo que no sabemos.

Hace 26 siglos, en la antigua Grecia, Heráclito de Éfeso y Parménides de Elea, dos personajes con cierta inquietud intelectual, se empezaron a hacer preguntas trascendentes sobre la Naturaleza, la vida, el ser y la existencia. Sus pretensiones eran muy ambiciosas, y apresuradas, pues buscaban la respuesta a muchas preguntas importantes sin tener datos. El procedimiento para conseguir este imposible era exclusivamente dejarse llevar por la imaginación, como niños que juegan a pensar en mundos imaginarios. Es obvio que la actividad de la mente, sin la comprobación empírica que la corrija es estéril, pues si a la actividad especulativa no se le pone algún freno, no hay forma de detenerla. En efecto, el primer resultado de aquellos pensadores fue comprobar que la cabeza decía una cosa y que los sentidos decían otra. ¿Cómo podría resolverse el conflicto? Heráclito no llegó a ninguna conclusión al respecto y se mantuvo toda su vida lleno de perplejidad ante esa discrepancia. Al contrario, Parménides, quizá influido por el éxito de la escuela de Tales

de Mileto, quien había empezado a desarrollar la teoría de la Geometría, decidió que puesto que la mente es mucho más perfecta que los sentidos (?), era a ésta de quien uno debía fiarse, y no de aquéllos. El resultado es bien conocido: a partir de aquí surgió toda una escuela de pensamiento con Platón y muchos otros, que pretende llegar al conocimiento de la Naturaleza, la vida, el ser, el hombre, la existencia, etc... sin corregir las especulaciones mentales con la comprobación empírica, es decir, dejándose llevar por la imaginación desenfrenada, pretendiendo con ello llegar al conocimiento de la Naturaleza sin tener en cuenta los datos. Es increíble que todavía se siga manteniendo esa actividad en nuestra cultura y algunos hayan llegado a considerarla como *considerere* como la máxima expresión de la condición humana. Si el hombre se diferencia de los animales en que no corrige las especulaciones mentales con los datos empíricos, no es extraño que tropiece dos veces en la misma piedra.

Los filósofos dicen que la filosofía se define no por los medios para contestar las preguntas, sino por la índole de las preguntas que se hacen. En cierto sentido la filosofía es una actividad de impacientes pues siempre se ha hecho preguntas prematuras, cuando aún no había medios para contestarlas. Parece como si los filósofos prefiriesen hablar de las cosas antes que emprender la tarea más larga y laboriosa de su conocimiento científico.

Los filósofos intentan justificar su proceder alegando que sus preguntas pertenecen a otro terreno, que están al margen de la ciencia, que la ciencia jamás podrá contestarlas, que la ciencia, con ese método tan simple jamás será capaz de abordar las cuestiones fundamentales, y que en consecuencia la ciencia no les interesa, que la filosofía está muy por encima de todo eso. Lo que probablemente nunca pensaron los filósofos es que iba a llegar un día en que la ciencia empezaría a contestar esas preguntas, y que entonces las contestaría de una forma tan contundente y con pruebas científicas—no con opiniones de doctrinas y escuelas, sino con un consenso entre los especialistas—de forma que ya no hubiese sitio para más discusiones filosóficas.

Hoy, muchas de las preguntas clásicas de la filosofía ya se han contestado científicamente, y en consecuencia han dejado de ser filosóficas. Por ejemplo, la pregunta clásica citada por Bertrand Russell en su obra *Los problemas de la filosofía* [4] sobre apariencia y realidad: “¿Hay en el mundo algún conocimiento tan cierto que ningún hombre pueda dudar de él?” A la vista de la figura 1, esta pregunta no tiene sentido.

Otro ejemplo: la pregunta fundamental: ¿por qué existimos? Conociendo el mecanismo de la selección natural podemos contestarla. Primero, vamos a generalizarla para cualquier especie, y luego vamos a transformarla en esta otra: ¿por qué la jirafa, el gato o el gorrion se han seleccionado? Respuesta: porque tuvieron el *motivo* y la *oportunidad* (esto no es muy diferente de la investigación en las novelas policiacas). El moderno conocimiento de las leyes de la evolución biológica nos enseña que la aparición de una especie nueva en un sitio es la consecuencia de estos dos hechos: un motivo, una razón de ser que justifique su existencia (en concreto: un sitio—un nicho ecológico—disponible) y una oportunidad: que se haya producido una combinación de genes que la hagan posible, y que una especie precursora haya tenido la oportunidad de pasar por allí. Hay varios hechos que prueban estas afirmaciones; por ejemplo, la diversidad de los pinzones en las Islas Galápagos, como

prueba positiva, y la ausencia de mamíferos autóctonos en esas islas, como prueba negativa; en este caso existió el motivo (hay nichos de sobra para alojar a muchas especies diferentes de mamíferos), pero no se dio la oportunidad, pues al contrario de lo que ocurrió con los pinzones, no hubo mamíferos que colonizaran las islas. Ya de nada sirven divagaciones filosóficas sobre el fin último o sobre la intencionalidad de la creación. La diferencia entre selección natural y selección artificial es que la segunda se efectúa con arreglo a un plan, por ejemplo: vamos a producir una vaca que dé mucha leche, o un perro que tenga el hocico alargado, las orejas largas y las patas cortas, mientras que la selección natural trabaja sin un plan previsto, limitándose a resolver el problema de cada día. Todo esto está científicamente probado, pero no me extenderé ahora. En este campo ya no queda espacio para discusiones filosóficas.

Veamos otro tópico que se repite con frecuencia sin mucho sentido: “La ciencia no se pregunta ni resuelve, ni puede aclarar el porqué de las cosas, sino el cómo”. Cajal (1852-1934) [5, p. 14] aceptaba esta premisa, abundando en una consideración de Claude Bernard (fisiólogo francés, 1813-1878, considerado el fundador de la medicina experimental):

“Como ha declarado Claude Bernard, el investigador no puede pasar del determinismo de los fenómenos; su misión queda reducida a mostrar el cómo, nunca el porqué de los cambios observados. Ideal modesto en el terreno filosófico, pero todavía grandioso en el orden práctico, porque conocer las condiciones bajo las cuales nace un fenómeno nos capacita para reproducirlo o suspenderlo a nuestro antojo, y nos hace dueños de él . . .”

Esta idea ha sido considerada el lugar común de diferencia entre ciencia y filosofía durante mucho tiempo, pero no es así. La ciencia siempre se ha preguntado el porqué de las cosas; lo que ocurre es que esa pregunta es muy difícil y su contestación para cada caso ha sido muy laboriosa. Hoy día la ciencia ha contestado a la pregunta del por qué en muchos casos, además del ejemplo que acabo de comentar. Siempre que podemos explicar un fenómeno sabemos *por qué* es así. Es muy importante distinguir entre contar una cosa y explicarla—y esto también debe aplicarlo un profesor en clase—. Contar algo es decir el *cómo*; explicarlo es justificar el *porqué*. Y uno está en condiciones de explicar por qué las cosas son de una forma cuando puede comprender por qué no son de otra manera.

Además del ejemplo del porqué de la existencia del hombre, comentado arriba, también se conoce el porqué de muchos otros como por ejemplo, por qué reacciona el ácido sulfúrico con el hidróxido sódico (no sólo cómo y en qué condiciones lo hace), lo cual permite hacer muchas predicciones sobre qué otras sustancias reaccionarán, e incluso explicar las razones del cómo, conocer bajo qué condiciones deben reaccionar, etc. No sabemos el porqué de muchas cosas, como por ejemplo la fuerza de la gravedad, pero sí sabemos por qué es el DNA la molécula encargada de guardar y transmitir la información genética—no sólo cómo se hace esto. La respuesta es: porque otros polímeros como las proteínas no pueden hacerlo, o no serían tan eficaces para esas funciones. También sabemos por qué ocurre la evolución, no sólo cómo ocurre: porque el DNA no es un material absolutamente estable y los cambios aleatorios que puede sufrir son inevitables, etc.

¿Pierde, pues, campo de acción la filosofía al avanzar la ciencia? Más bien el avance de la ciencia desplaza el campo de la filosofía. Admitamos que algo de filosofía, convenientemente dosificada para no perder el control de la mente, es bueno, pues es indudable que

hacerse preguntas trascendentes que no puedan resolverse ahora mueve la inquietud de los investigadores y les fuerza a buscar métodos para resolverlas. Entonces, puesto que la filosofía consiste en hacerse preguntas trascendentes sobre temas no abordables por la ciencia, igual que el progreso de ésta le cierra caminos por detrás, se los abre por delante.

Teoría del conocimiento formal

Lo que llamamos el método científico debería llamarse en realidad la forma general—y única—de conocimiento formal, pues como veremos a continuación no existe otra forma de conocer la realidad.

¿Qué significa conocer una realidad? El conocimiento, como ya hemos indicado al principio, es una actividad progresiva [1]. Las cosas no se conocen nunca del todo, a no ser que nos conformemos con un conocimiento muy simple, como por ejemplo, nos baste con saber que tal cosa es una estrella, un árbol, un niño, o una silla. Sabemos que algo es una silla por definición, porque a eso lo llamamos silla, pero eso no es realmente conocimiento. Por darle un nombre a un objeto no sabemos más de él. Las ciencias que empiezan se invaden de nombres, pero eso no demuestra que estén muy desarrolladas.

En *La perspectiva científica* [6, pp. 27-28], Bertrand Russell comenta:

“El método científico, a pesar de su sencillez esencial, ha sido obtenido con gran dificultad y aún es empleado únicamente por una minoría, que a su vez limita su aplicación a una minoría de cuestiones. Consultemos a un hombre de ciencia sobre partidos políticos, religión, impuestos, problemas sociales y temas análogos, y le oiremos expresar opiniones nunca comprobadas, con un dogmatismo que jamás desplegaría respecto a los resultados bien cimentados de sus experiencias de laboratorio. Este ejemplo demuestra que la actitud científica es en cierto modo no natural en el hombre”.

El método científico tiene una aplicación universal y, a pesar de lo que afirma Russell, todo el mundo lo aplica para multitud de cosas. Veamos algunos ejemplos:

(1) Un artillero mide la distancia al objetivo—lo cual no es sencillo—, luego hace una serie de cálculos matemáticos, para calcular la inclinación que debe darle al cañón, teniendo en cuenta la potencia del disparo, la dirección y fuerza del viento, el rumbo y velocidad de su propio barco... (es decir, hace una serie de cálculos teóricos partiendo de una serie de datos empíricos, y llega a un resultado. Entonces dispara (esto es un experimento), pero no da en el blanco, lo cual es en cierto modo previsible. Un ayudante observando con unos prismáticos estima la desviación del disparo y se la dice; entonces el artillero corrige sus cálculos y determina la nueva inclinación y dirección del cañón, y vuelve a disparar; puede que tampoco acierte ahora, pero su disparo llega ahora más cerca; el fenómeno puede repetirse dos o tres veces, pero este procedimiento asegura inevitablemente que al fin se da en el blanco con muy pocos intentos.

(2) Un carpintero debe cortar una serie de tablas con una anchura determinada. La sierra mecánica que va a usar es una máquina bien equipada y, en principio de buena precisión, de manera que se puede ajustar como uno desee; nuestro carpintero ajusta la máquina de acuerdo con las indicaciones del fabricante, pero después de hacerlo no procede a cortar toda la madera sin más; al contrario hace un pequeñísimo corte en una tabla y mide el resultado (a veces, incluso utiliza una tabla inservible de prueba); si no le satisface el resultado corrige levemente la posición del disco de sierra y vuelve a hacer un corte leve que vuelve a medir. Es decir, mide el resultado y vuelve a la teoría, y repite la operación—ajustando la máquina cada vez con mayor finura—hasta que consigue el resultado deseado; entonces ya sin más, corta

todas las tablas sin medir más —o si acaso, midiendo de vez en cuando para comprobar que la máquina no se desajusta con la vibración.

(3) Un médico diagnostica una enfermedad: sus conocimientos teóricos (producto de la abstracción inductiva de otros casos que ha tenido antes, combinada con lo que ha estudiado sobre esa enfermedad) le llevan a recetar una serie de medicinas. Pero al mismo tiempo ordena a su paciente que vuelva pasados unos días, a fin de corregir su diagnóstico y sus prescripciones. Otro tanto hace el cocinero al preparar un guisado: el punto se consigue probando el resultado y para corregir la receta original.

(4) Los profesores de canto dicen que la mayor dificultad del aprendizaje del canto es que a diferencia del violín, el piano o la guitarra, cuando uno canta no oye su propia voz como la oyen los demás, y así no puede corregir el timbre, el volumen o la entonación, las modulaciones, los matices, etc. Al contrario de cualquier otro instrumentista que toca aplicando su técnica para corregir continuamente el sonido de su instrumento, el cantante tiene que cantar dependiendo estrictamente o casi completamente de la teoría. Por esto, probablemente el canto es la más filosófica de todas las actividades artísticas. Beethoven sufrió una profunda sordera al final de su vida, pero tenía suficiente experiencia para "oír" su música en la partitura sin necesidad de escuchar su ejecución por una orquesta. El oído físico (no el musical) no es del todo esencial para un compositor cuando éste ya tiene suficiente práctica (desde luego lo es al principio de su carrera). Si después de escribir una partitura su ejecución no resulta del agrado del compositor, éste suele aconsejar que se modifique la ejecución, pero raramente eso le lleva a modificar la partitura.

(5) Sólo podemos afirmar que conocemos algo cuando somos capaces de predecir su comportamiento ante un estímulo. Sabemos conducir un coche cuando estamos seguros de que girando el volante a la derecha todo el coche girará a su vez, y que al apretar un determinado pedal frenará. Al cambiar de coche debemos de hacer unos ajustes previos para saber cuánto debe apretarse el freno, etc.

(6) La práctica se extiende a campos que están fuera del mundo de la tecnología; por ejemplo, el conocimiento de una persona: sobre la base de unos datos empíricos nos hacemos una idea abstracta de su forma de ser. Esta idea nos lleva a hacer predicciones ("si le preguntas esto te va a contestar que no"). Con frecuencia acertamos si le conocemos bien, pero a veces fallamos y eso nos lleva a corregir el concepto que tenemos de esa persona, al punto del ajuste fino. Así, cada vez la conocemos más, y los errores tienen cada vez menos importancia.

* * *

Russell tiene razón, sin embargo, cuando afirma que muchas personas —y aún gente de ciencia—no aplican el método científico para ciertas cuestiones importantes, pero creo que los ejemplos expuestos demuestran que no la tiene cuando dice que este método es algo no natural en el hombre. Probablemente lo que ocurre es que la gente aplica el método científico cuando es seguro, y para ciertas cosas donde su aplicación parece bastante obvia, pero cree que existen ciertos campos donde no puede aplicarse (quizá porque todos tienen algo de filósofos). En realidad, debido posiblemente a una falta de cultura científica, el hombre de la calle suele admitir que hay un espacio fuera de la ciencia—el dominio de lo esotérico. La extensión de ese campo depende de la cultura científica de cada uno.

Cualidades que debe tener un científico

El método que he comentado es sólo una parte del camino para la construcción del conocimiento científico. Es, en realidad, el *sistema de trabajo* del científico, la herramienta, cuyo manejo debe aprender y dominar, pero la construcción de cualquier cosa no se puede explicar sólo con la potencia de la herramienta. Se necesita una persona que la maneje. ¿Qué

características debe tener esa persona para hacer maravillas con esa herramienta? ¿Qué cualidades debe tener un científico?

La diferencia entre el mérito de la herramienta y el de quien la maneja se puede generalizar a cualquier campo, aunque en algunos es más obvio. Algunos campos del arte, como la creación literaria o la composición musical, no requieren más que el artista y unos medios muy simples; otros, como el cine o la ejecución musical no son posibles sin un grandioso alarde técnico, pero sin un genio que la haga, la película o la ejecución de la obra musical será muy mala por muy costoso y grande que sea el aparato técnico que lo soporta, y por mucho personal que trabaje en ello. Mucha de la ciencia que se hace hoy requiere, desde luego un complejísimo y costosísimo aparato técnico—incluido el personal especializado que lo tiene que manejar— pero sólo con eso no es suficiente.

Un buen científico debe tener cuatro cualidades fundamentales; casi diría tres cualidades básicas y una adicional. Las tres básicas son: educación científica, inteligencia, y creatividad, y la adicional es una gran capacidad de sacrificio. Como se ve, esto no es muy diferente de lo que se supone que debe tener un artista.

La educación es necesaria porque siempre hay que conocer la técnica para desempeñar cualquier actividad, sea ésta desentrañar un problema científico o tocar el violín. En la conferencia de Krebs citada arriba [3] hay unos comentarios muy interesantes sobre la educación científica, y la creatividad:

“Para hacer preguntas correctas en biología, un investigador debe tener: (1) Un conocimiento básico de la biología y esto significa conocer cómo funcionan las células vivas. Sin una buena base en biología, los químicos y físicos, se arriesgan a preguntarse cuestiones de poco interés para el estudio de la vida. (2) Imaginación. Esto también es esencial para idear nuestros métodos de investigación. La capacidad de pensar intensamente y de mantener la concentración durante mucho tiempo, es un componente de la imaginación creadora. Muchos científicos han observado que las ideas nuevas les llegan sin esperarlas, después de haber estado mucho tiempo dando vueltas a un problema, o mientras estaban hablando acerca de ello a colegas o en casa, en el jardín o en cualquier otro lugar inesperado. Por otro lado, hay gente muy inteligente que nunca tiene ideas creadoras y permanecen estériles en investigación científica. ¿Se puede enseñar la creatividad científica? Probablemente no, aunque buenos maestros puedan hacerla madurar. Parece que hay un componente innato muy importante, pues en la vida académica se ven a menudo estudiantes brillantes que en ciencia son estériles. Esto es análogo a la diferencia que existe entre un actor brillante, un crítico o un buen músico por un lado, y por el otro, el brillante escritor o compositor. Aquéllos que carecen de imaginación eligen un trabajo análogo”.

La creatividad es necesaria porque el avance de la ciencia no es exclusivamente *machacar* el conocimiento profundizando en lo que ya se sabe que existe, sino descubrir cosas nuevas, y para eso hay que tener imaginación. La ciencia creativa, la que intenta descubrir fenómenos nuevos, la que no se limita a hacer un inventario más o menos detallado de las propiedades de los hechos ya conocidos, es la más valiosa. Sin embargo hay muchísimas personas ocupando puestos relevantes de científico que no son creativos, y que no reconocen el valor de la creatividad. Para ellos la ciencia no es más que rellenar huecos de detalles del conocimiento. Muchas de estas personas defienden persistentemente la idea equivocada y absurda de que todas las cosas se descubren por casualidad, y que eso le puede ocurrir a cualquiera, y niegan que el científico deba ser creativo, porque para ellos la cien-

cia no es creativa. Para ellos el progreso de la ciencia es sólo una contingencia o el resultado obvio del desarrollo de técnicas más avanzadas, las cuales tampoco se deben a grandes ideas, sino a la aplicación obvia de cosas que ya se conocían. Más adelante volveré sobre esto citando una frase muy acertada de William James [7].

El antagonismo de la creatividad es la criticidad. Un buen científico debe tener equilibrio entre la capacidad creativa y la capacidad crítica, pero es preferible ser más creativo que crítico. Los individuos supercríticos son malos científicos. Hay incluso insensatos que presumen de ser el crítico del grupo. Por lo general ellos no aportan ninguna idea para el avance de la investigación y en lugar de eso obstaculizan la creatividad de los demás. Para ellos nada está probado excepto los hechos triviales. Sin embargo, la ciencia debe ser audaz, y puede permitirse serlo, pues para eso tiene su método que la corrige. El profesor José M^a Albareda (1902-1966), catedrático de la Universidad Complutense de Madrid, fundador de la edafología en España, y maestro de muchos investigadores expresó muy bien esto, en los párrafos que reproduzco a continuación [8]:

“El investigador debe saber y saber mucho. Pero en ese juego de analizar, comparar, integrar, la investigación exige la actividad de la iniciativa; no basta la actitud pasiva de las grandes mentes receptivas; no basta el reflejo ni la espléndida continuación de reflejos; hay que juzgar y producir, formarse idea y forjar ideas.

“La investigación no se conforma con enjuiciar, exige producir, y es también producción frente a la hipercrítica demoledora, a eso que podríamos llamar “exceso de juicio”. El mundo parece a veces dividido en dos grupos: los que producen y los que juzgan.

“Producir acertadamente exige juicio y crítica, además, la desgraciada amplitud de las deficiencias y desvíos humanos impone tareas juzgadoras. Pero es más fecundo producir que dedicarse a juzgador espontáneo. El mundo no puede dividirse en productores irresponsables y espectadores críticos. El que produce ha de tener un hondo sentido de responsabilidad y de autocrítica depuradora de cuanto va creando; el que juzga debe tener un directo conocimiento de las realidades sobre las que opera y un vivo deseo constructivo en toda su actuación. Nuestro peligro está más que en el exceso de vana producción, en el exceso de un juicio espectador o perturbador.”

Un científico debe tener inteligencia. Este es uno de los puntos más tortuosos de este discurso porque la inteligencia es una cualidad que, en general, nadie reconoce no tener. En principio, cualquier aspecto de la inteligencia es bueno para el científico; por ejemplo, si uno tiene una capacidad inventiva y de improvisación para resolver problemas con el material que tiene a mano, si sabe buscar rápidamente la información que necesita... Todo eso es muy bueno, y cuanto más se tenga mejor científico será uno, pero la inteligencia es estrictamente imprescindible para la abstracción, la construcción de la teoría a partir de los datos empíricos. Esto empieza por reconocer los hechos relevantes y distinguir el orden de magnitud de cada dato, pues sólo una teoría muy elaborada puede incluir datos de diferente rango de importancia. Al comentar un caso, Sherlock Holmes le dice a su amigo Watson [9]:

“Este es uno de esos casos en que el arte del razonador debería emplearse más en el examen minucioso de los detalles antes que en la búsqueda de nuevas pruebas. El tema es tan importante que padecemos un exceso de suposiciones conjeturas e hipótesis. La dificultad está en separar el armazón y los adornos de los hechos de los hechos absolutos e innegables. Luego, tras habernos situado sobre esta sólida base veremos qué inferencias pueden sacarse, y cuáles son los puntos esenciales en torno a los cuales gira el misterio”.

¿Cómo se construyen las teorías? En general, una teoría, o un modelo teórico, que pretenda explicar y formalizar la razón de unos hechos, debe ser el modelo mínimo, es decir, en principio, lo menos imaginativo posible, pues al principio, en los primeros pasos de la construcción de una teoría hay que ser muy cauto y ceñirse lo más posible a los hechos. El modelo mínimo significa un modelo que sea el más sencillo posible para explicar *todos* los hechos conocidos. No hay que caer en la trampa de descartar hechos, ni pasar por alto algunas consecuencias lógicas de esos hechos con el pretexto de construir una teoría muy simple. Como dijo Einstein, las cosas deben ser explicadas de una manera simple, pero no demasiado simple. Theo, el protagonista de las novelas policíacas de James Endhard [10] tiene una frase muy acertada al respecto cuando en el curso de una investigación comenta:

"¡Ah, los hechos! Basta con que uno los mencione para que sean interpretados en la forma más sencilla y aparente... Pero no debe ser así, amigo mío. Los hechos deben ser interpretados con lógica, aún cuando ésta nos conduzca a resultados más complicados y menos visibles a primera vista"

Pero por otra parte—y esto es un punto de dificultad—hay que ser capaz de reconocer los hechos relevantes y distinguir el orden de magnitud de cada dato, pues sólo una teoría muy elaborada puede incluir datos de diferente rango de importancia. Esto no es sencillo y aquí se necesita una inteligencia especial. Pero la aplicación reiterada de la rueda del método permitirá reconocer los hechos relevantes y construir la teoría sobre ellos.

La abstracción teórica es la parte más difícil de la investigación científica. Es quizá el punto en el que se necesitan más cualidades especiales, como capacidad de abstracción, intuición, capacidad de jerarquizar los hechos, mente matemática, etc, pero sobre todo ahí es donde se requiere la imaginación creativa, es decir, donde el científico tiene que ser realmente un artista. Por eso ésta es una actividad que pocos pueden hacer, porque en general hay pocos artistas en el mundo.

La abstracción teórica con ser la más difícil es también la actividad más incomprendida y lo que muchos autores consideran el punto más débil de la ciencia; para éstos la ciencia es exclusivamente la recopilación de datos. Este es el punto en el que más errores, imprecisiones o divagaciones encuentra uno en los libros de texto, y también, en general, la menos desarrollada de las ciencias. Los científicos que se dedican a la teoría son una minoría, y los índices de impacto de las mejores revistas teóricas como el *Journal of Theoretical Biology*, el *Bulletin of Mathematical Biology*, o el *Journal of Mathematical Chemistry*, son mucho más bajos que las revistas experimentales de la misma calidad en esos campos [11], lo que indica que tienen muy poco público.

La actividad teórica en la ciencia no es bien comprendida, incluso por científicos relevantes. Por ejemplo, Cajal, en sus reflexiones sobre la investigación científica *Los tónicos de la voluntad* [5, p. 92] arremetía despiadadamente contra los científicos que se dedican a la teoría:

"El medio científico actual es tan poco propicio a las teorías que aún los que llevan el sello del genio necesitan para imponerse lustras de lucha y de incesante labor experimental. ¡Han caído tantas doctrinas que parecían inmovibles! En el fondo, el teorizante es un perezoso disfrazado de diligente. Sin percatarse de ello obedece a la ley del mínimo esfuerzo. Porque es más fácil forjar una teoría que descubrir un fenómeno. Liebig, buen juez en estas materias, escribía

paternalmente al joven Gabbard, químico de grandes alientos, pero harto inclinado a las síntesis ambiciosas: "No hagas hipótesis. Ellas te acarrearán la enemistad de los sabios. Preocúpate de aportar hechos nuevos. Los hechos son los únicos méritos no regateados por nadie".

Es muy desalentador ver estos pensamientos en los clásicos. ¿Cuántos investigadores jóvenes se habrán formado con esas enseñanzas? ¿A qué se debe esa actitud? Quizá a que hay dos tipos de 'teorizantes': el creativo, que es el que aporta ideas nuevas, y el especulativo que sólo busca justificar los sucesos, no a poner en marcha la teoría deduciendo propiedades predictivas con rigor. Quizá la abundancia de elementos de esta especie improductiva y la escasez de la buena es lo que ha producido una aversión general a la actividad teórica, pero quienes piensan así ignoran lo que es en realidad una teoría científica, y que ninguna ciencia existe sin una teoría que la justifique. De todas formas, Cajal insiste en este punto en otra obra: *El pesimista corregido*, una narración de ciencia-ficción, de la obra *Cuentos de vacaciones* [12, pp. 152-206]:

Un joven científico se lamenta de la pobreza de recursos que tiene el cuerpo humano para conocer los hechos; los ojos —dice— son rudimentarios instrumentos de óptica, el oído apenas percibe sonidos con claridad, etc. ¿Cómo podrá avanzar así la ciencia? Sumido en estas reflexiones depresivas, al personaje se le aparece una noche *el genio de la ciencia* y tras reprocharle su actitud, con objeto de demostrarle que sus quejas son injustificadas y estériles, le concede el don de una visión microscópica y telescópica de alta resolución, que podrá disfrutar durante un año, vaticinándole que se arrepentirá de ella. El protagonista de esta historia pasa a continuación una temporada horrible pues le resulta repugnante todo lo que ve a simple vista, pero una vez superado esto decide poner su don al servicio de la ciencia y se dedica a desentrañar los misterios más insondables de la histología, la microbiología y la astronomía, y publica varios artículos dando cuenta de un montón de descubrimientos tan espectaculares como inverosímiles (no se especifica cómo los *referees* aceptaron esos artículos). Y entonces es cuando—según cuenta Cajal— este pobre hombre recibe la más grande de las decepciones, pues nadie le cree porque nadie es capaz de verificar esas observaciones. Nadie dispone de un microscopio ni de un telescopio tan potentes, y al no poder verificar los hallazgos le toman por loco, y a la postre, el tal pesimista abomina del don concedido, y tiene que aguardar con paciencia a recuperar su estado inicial, olvidarse de lo que había aprendido y, corregido de su ambición, retornar a la vida normal.

La historieta parece muy lógica, y puede ser divertida, pero no es correcta. Pues con el método científico en la mano este individuo habría aplicado un recurso obvio. Supongamos que observa una estructura celular desconocida con muchísimo detalle. Eso es como si tuviese ya hecha la teoría. Entonces siempre podrá diseñar un experimento que demuestre la existencia de esa estructura. Por ejemplo, supongamos que vivimos en una ciudad enorme, como Madrid, o Nueva York, pero todos los habitantes ignoran la estructura de la ciudad. Supongamos entonces que el genio de la ciencia nos concede el don de volar muy alto, de forma que podamos hacer una foto aérea de la ciudad completa. Entonces, tendríamos un plano de la ciudad, es decir, un esquema teórico de su estructura, y con él podríamos diseñar una serie de experimentos, tales como: si un coche entra por aquí tendrá que salir por allí, que demostrarían que el modelo representa fielmente el objeto real. Que el plano lo hayamos hecho nosotros a partir de una serie de hechos, o que nos lo haya dado el genio de la ciencia como un favor personal, no viene al caso. Lo cierto es que siempre podremos demostrarles a los incrédulos que el plano funciona. El protagonista de este cuento desconoce dos hechos que pueden verse en la figura 1: el papel de la teoría en la

construcción de la ciencia; y el valor de los experimentos para demostrar las predicciones teóricas, no para buscar cosas al albur, sin justificación teórica.

Esta idea ha sido muy bien expresada por William James [7], quien sostenía que el significado de las ideas sólo se puede encontrar en los términos de sus consecuencias. Si no hay efectos, esas ideas no tienen sentido. James defendía que este es el método empleado por los científicos para definir sus términos y para comprobar sus hipótesis, que, si poseen sentido, llevan a predicciones. Las hipótesis pueden considerarse ciertas si las predicciones se cumplen. Por otro lado, casi todas las teorías metafísicas carecen de sentido, porque no producen predicciones comprobables. Según el pragmatismo de James, por tanto, la verdad viene dada por lo que funciona, y esto se decide mediante la comprobación de las proposiciones en la experiencia.

Por último, la capacidad de sacrificio es una cualidad que debería tener todo el mundo, y es especialmente necesaria para ciertas profesiones y actividades. Pero la investigación científica requiere esta cualidad en muy alto grado. El oficio de científico es muy sacrificado, porque la investigación es una actividad absorbente en tiempo y en pensamiento. El científico no puede ajustarse a un horario, y cuando sale de su laboratorio continúa pensando en los problemas. He considerado esta cualidad en un rango diferente porque no tenerla significa desperdiciar las otras tres. El científico debe ser activo y eso otra vez exige sacrificio.

Pero esta cualidad determina una vida muy dura, y muy dependiente de otras personas, pues el sacrificio siempre es a costa de algo y alguien; Eso lleva a que el científico descuide otras obligaciones de la vida, y se aleje, en general, de lo cotidiano, lo que inevitablemente recae en otras personas. Cuando uno se deja cosas sin hacer tiene que venir otra persona detrás. Y llegado a este punto, permitidme que destaque la labor que mi mujer, María Rosa, a quien debe reconocerse gran parte del mérito de mi producción científica, además de muchas otras cosas, y exprese mi agradecimiento a mis hijos, Ruth y David porque los tres han tenido que soportar estos excesos que aquí declaro necesarios para que la ciencia progrese.

Actividad de un científico

Un investigador científico tiene cuatro obligaciones: crear ciencia, publicarla, transmitirla y divulgarla. Hay que insistir en esto, porque muchas veces no se tiene del todo en cuenta y se descuida alguna de estas partes. Igual que un científico sólo es completo si hace teoría y experimentos —o interviene, directa o indirectamente, en ambas prácticas— también sólo es completo si hace estas cuatro actividades.

La construcción de la ciencia es una labor muy artesana y, si se quiere, local. No se piense, pues, que la producción de la ciencia grande está confinada a los grandes centros de renombre mundial. Esto es muy importante porque permite que cualquier investigador, por modesto que sea, pueda hacer una revolución científica publicando sus resultados, sin tener que someterse a comités oficiales, aunque a veces, como veremos, la política editorial de las revistas puede llegar a funcionar como un grupo de presión muy poderoso. La aceptación de las grandes teorías científicas es un hecho mucho más laborioso y lle-

no de obstáculos. Su formulación original suele ser demasiado simple, y con pocos datos, y se necesita mucho tiempo y muchos datos para que se consideren aceptadas. Pero no hay un comité oficial para dar los hechos por científicamente probados, sino que esa condición se establece cuando resulta evidente que hay consenso entre los especialistas, y las voces discrepantes lo son cada vez menos. De todas formas, hay que resaltar una característica importante de la ciencia: todo hecho o teoría está siempre dispuesto a ser revisado. Esa revisión no suele ser fácil incluso cuando los hechos demuestran que es necesaria.

* * *

Conseguir un resultado no es el final de una investigación. Un resultado sin publicar es sólo un dato, sin carta de existencia hasta ser publicado en una revista cuya publicación esté intervenida por un proceso de crítica de *referees* (censores). Este hecho es tan decisivo en la ciencia que es el criterio fundamental que determina lo que es ciencia y lo que no es. Como consecuencia de ello, la política editorial de las revistas llega a dominar la política científica—lo cual es un problema que trataré después. Por otra parte, no todas las revistas científicas tienen el mismo valor. Hay un *ranking* internacional de *índices de impacto*, que se revisa anualmente [11], y es obvia la importancia que tiene publicar un resultado en la mejor revista posible.

Nadie acepta un resultado científico publicado en una revista que no tenga *referees*, pues se considera un dato sin control de calidad. Sin embargo, este procedimiento también promueve ciertas dificultades al avance de la ciencia, pues exige que cualquier idea innovadora debe contar con la aquiescencia de otros científicos, alguno de los cuales podría ser precisamente el defensor de la doctrina contraria. Después trataré este problema.

Un resultado científico es, por supuesto, refutable, pero la crítica científica debe hacerse oportunamente. No es ético negar un resultado científico que está publicado en una buena revista y que no ha sido contestado. Si alguien no está de acuerdo debe presentar resultados en contra o contestar a la discusión, a ser posible, en la misma revista. Una de las bases del progreso de la ciencia es que deben respetarse los datos publicados no refutados como ciencia aceptada.

La transmisión de la ciencia, al igual que su discusión, debe hacerse en un contexto crítico; es decir, al tiempo que se presentan, se comentan y se critican otros, a fin de que haya elementos de juicio para criticarlo, y en un foro que esté al alcance de otros especialistas los cuales puedan expresar su opinión, favorable o discrepante, y de otros científicos interesados, no especialistas.

Un resultado científico es, por supuesto, refutable, pero la crítica científica debe hacerse oportunamente. No es ético negar un resultado científico que está publicado en una buena revista y que no ha sido contestado. Si alguien no está de acuerdo debe presentar resultados en contra o contestar a la discusión, a ser posible, en la misma revista. Pero de la misma forma que un resultado científico no existe hasta que no ha sido publicado, un resultado publicado debe respetarse hasta que no haya sido refutado en una publicación de igual rango. Un *referee* no debería, pues, rechazar un artículo aduciendo, por ejemplo, que el trabajo está basado en una hipótesis errónea, si tal hipótesis está publicada y no ha sido re-

futada. Una de las bases del progreso de la ciencia es que deben respetarse los datos publicados no refutados como ciencia aceptada.

La transmisión de la ciencia, al igual que su discusión, debe hacerse en un contexto crítico; es decir, la difusión de una teoría o de un resultado debe hacerse al tiempo que se presentan, se comentan y se critican otros, a fin de que haya elementos de juicio para criticarlo, y en un foro que esté al alcance de otros especialistas los cuales puedan expresar su opinión, favorable o discrepante, y de otros científicos interesados, no especialistas.

La crítica de una teoría científica debe hacerse preferiblemente por escrito. Los congresos son buenos foros para expresar la discrepancia a un conferenciante, pero si la crítica es importante, es mejor hacerla después de haber publicado un artículo bien documentado, pues la improvisación no da buen resultado en esto.

Recuerdo una serie de artículos publicados en el diario *ABC* de Madrid, en los años sesenta, escritos por un catedrático de física de la Universidad Complutense cuyo nombre omitiré, tratando de rebatir la teoría de Einstein; no sé si el autor habría intentado publicarlos en una revista científica y se los habrían rechazado, o es que de verdad pensaba que un periódico dirigido al lector de la calle en España era el mejor medio para polemizar sobre la teoría de la relatividad. Esto es muy ridículo. ¿A quién le sirven esas polémicas? Cuando alguien escribe una opinión científica debe hacerlo en un medio donde los lectores le puedan contestar. ¿Esperaba, pues, el autor que los físicos de Estados Unidos, Alemania e Inglaterra le contestasen en ese mismo medio? ¿Quería el director de ese periódico organizar una polémica científica mundial a ese nivel en un periódico más o menos local? ¿Qué se supone que debería hacer y pensar un buen ciudadano con la cultura científica usual en España en esa época después de leer esos artículos? ¿Tomar partido por una de las dos tendencias?

La transmisión de la ciencia a estudiantes y discípulos es el núcleo de la docencia y la base de una escuela científica, pero además un investigador debe divulgar la ciencia, es decir, no sólo transmitirla a sus alumnos de elite, que van ya camino de ser especialistas en ese campo sino a la sociedad en general, a través de los medios específicos para ello. Pero la divulgación de la ciencia debe limitarse a los hechos bien probados. No caben polémicas científicas en medios de gran difusión popular, pues esta práctica debe ser una herramienta educativa de interés general, y las polémicas científicas son inevitablemente tan especializadas y técnicas, que el ciudadano medio no puede seguirlas, y le aburren. Hay que divulgar los hechos de la ciencia; los problemas de la ciencia deben también difundirse, pero en otros medios, como este foro que hoy nos reúne.

Karl Popper.—La ciencia es doctrina refutable

La aportación de Karl Popper, filósofo británico de origen austriaco (1902-1994), ha sido decisiva en el campo que algunos llaman “filosofía de la ciencia” pero que sería preferible llamar “teoría de la ciencia”. La tesis de Popper puede resumirse diciendo que *la ciencia es doctrina refutable* [13].

Según Popper, las teorías científicas son hipótesis a partir de las cuales se pueden deducir enunciados comprobables mediante la observación (en este punto coincide con James); si las observaciones experimentales adecuadas revelan como falsos esos enunciados, la hipótesis es refutada. Si una hipótesis supera el esfuerzo de demostrar su falsedad, puede ser aceptada [14].

La idea fundamental de Popper es que la ciencia se distingue de lo que no es ciencia, como la metafísica, el esoterismo, el mito, las religiones, y la superstición, más que por la acumulación de pruebas favorables, más o menos indiscriminadas, por la posibilidad de ser refutada. Según Popper, las teorías científicas, a diferencia de las que no lo son, pueden ser refutadas con hechos. Un científico debe estar siempre dispuesto a abandonar su teoría si se demuestra que no es correcta, y debe buscar pruebas experimentales que pudieran echarla abajo. El problema de las religiones y de los mitos es que en el caso de que no fuesen correctos, no existe una forma de demostrarlo, pero el conocimiento objetivo exige que se le dé una oportunidad a la postura contraria. Toda teoría debería someterse a esa prueba, cosa que no hacen los mitos, las supersticiones y las doctrinas metafísicas o religiosas. Popper decía que la falsa ciencia se traiciona a sí misma en su afán de ser cierta. Para resumir esta idea: Una teoría científica es, según Popper, aquella capaz de diseñar un experimento cuyo hipotético resultado negativo pudiese demostrar que es falsa.

Popper considera la psiquiatría freudiana y la astrología ejemplos típicos de teorías pseudocientíficas y esotéricas pues, según dice, no hay ninguna vía que pudiese demostrar su falsedad. La psiquiatría freudiana se desarrolla y se ejercita a base de acumular pruebas sobre la misma idea: que la neurosis y otros desórdenes mentales son el resultado de incidentes acaecidos en la primera infancia. Según esta teoría, el paciente no tiene un conocimiento consciente de tales incidentes, pero los hechos están guardados en una especie de memoria no accesible (el subconsciente); entonces, si se los hacen recordar, al juzgarlos con mentalidad de adulto, comprenderá que eran nimios y se deshará de sus traumas. De manera que lo que tiene que hacer el psiquiatra es sacarlos a la luz, indagando en su pasado mediante la técnica del psicoanálisis.

No es cuestión de analizar ahora qué puede haber de cierto en todo esto, pero examinemos esta doctrina a la luz de las consideraciones de Popper. Supongamos que fuese falsa. ¿Existiría alguna posibilidad de demostrarlo? Es importante reconocer la necesidad de esa prueba. Si la teoría no es falsa saldrá airosa, pero si no existe esa vía, jamás podremos saber si es falsa o no.

Popper mantiene que la psiquiatría psicoanalítica no es refutable, y en consecuencia no es una teoría científica, ya que cualquier tipo de comportamiento, incluso dos contradictorios, puede ser explicado con esa teoría. “No existe una conducta humana lógicamente posible— afirma— que resulte incompatible con las teorías psicoanalíticas de Freud, Adler o Jung” [15, p. 46].

Toda ciencia está obligada a someterse a la prueba de Popper, pero el que una determinada ciencia no lo haya hecho aún no la descalifica, pues la ciencia progresa, y cada rama se va desarrollando a medida que acumula pruebas objetivas y explora nuevos terrenos. No podemos exigir que todas las ciencias hayan superado esa prueba; el problema es, más bien, si existe en los especialistas la aspiración de superarla.

Popper dedicó mucha atención al tema de la evolución biológica, y afirmaba que la evolución biológica no es una teoría científica porque no es posible diseñar un experimento cuyo resultado pudiese demostrar que la teoría es falsa [15, pp. 236-259; 16, pp. 225-

242]. Esto ha sido un punto de referencia fijo en este campo, y algo que se ha aceptado prácticamente sin discusión desde entonces hasta nuestros días.

Esto pensaba Popper hace cerca de 40 años, pero desde entonces las cosas han cambiado. Para empezar, hay que distinguir entre evolución y selección natural. Suele decirse que puesto que la evolución es un hecho, como la historia de Inglaterra, no es una teoría científica sino algo que ha ocurrido, que como todos los acontecimientos históricos es irreversible, que no puede volver a darse exactamente igual, etc. En suma, que no es reproducible y por tanto no se pueden hacer experimentos sobre ella.

Debemos, sin embargo, distinguir entre la historia y la investigación sobre la historia. La evolución es algo que ha ocurrido, y no es objeto de experimentos, pero la investigación de lo que ha ocurrido, y cómo ha ocurrido puede y debe hacerse usando el método científico. Todo hecho de la Naturaleza cuyo conocimiento se consigue a través del método científico es ciencia y constituye una teoría científica. De manera que la evolución lo es.

Creo, sin embargo, que el test de Popper se puede convalidar con la *inducción empírica*. Se trata de hacer muchos experimentos todos los cuales deben dar resultado positivo, o no dar ningún resultado si son inútiles, pero la condición es que no haya ningún resultado negativo. Este procedimiento debería aceptarse como prueba probabilística, pero hay que insistir en que para aplicarlo es imprescindible —y en eso se diferencia de nuevo de lo pseudocientífico y esotérico— que no haya ni un solo resultado negativo; no basta con que la mayoría lo sean, *todos* deben ser favorables a la hipótesis o indiferentes.

Al aplicar este criterio a la evolución biológica, vemos que no hay ningún dato procedente de la paleontología, de la genética, de la bioquímica, y de todas las otras ramas de la biología que contradiga el hecho de la evolución, y hay muchísimos que lo apoyan, de manera que la conclusión es que la vida actual procede por evolución de seres vivos precedentes, cuya forma, estructura y función ha ido cambiando a lo largo del tiempo (sin entrar ahora en el cómo y el porqué de esos cambios). Una vez que esto se ha averiguado usando el método científico, y que con las herramientas distintas de cada especialidad se llega a la misma conclusión, la evolución biológica pasa a ser un hecho científicamente probado, forma parte del acervo de la ciencia, y como cualquier otra parte de este contenido constituye una *teoría científica*.

Volvamos, sin embargo, a la proposición de Popper: Aparte de la extraordinaria acumulación de pruebas positivas, sin que nadie haya podido presentar una sola negativa, ¿podría, no obstante, hacerse algún experimento cuyo hipotético resultado negativo fuese capaz de demostrar que la evolución no habría ocurrido? Creo que no hace falta insistir en el extraordinario interés que tendría ese experimento. El esquema teórico que tenemos de la evolución biológica nos da la predicción de que el resultado de ese experimento sería desde luego favorable. Eso todos lo tenemos claro. El problema es si ese experimento puede diseñarse. Mi opinión particular es que sí se puede, pero no insistiré ahora en esto.

La segunda parte del dilema es la selección natural. Hay también una cantidad suficientemente grande de pruebas que la apoyan, procedentes de campos muy diversos tales como paleontología, bioquímica, genética, fisiología, microbiología y ecología—es decir, logradas con métodos muy diferentes—analizando aspectos diferentes de los seres vivos,

tales como el diseño del metabolismo, la forma del pico de los pájaros, el tamaño de la puesta, o la resistencia a los antibióticos, incluyendo grupos taxonómicos muy diferentes, como bacterias, hongos, plantas y animales.

Ante todo, aclaremos qué la selección natural es un mecanismo de optimización; un algoritmo muy eficaz de búsqueda para encontrar el máximo de una función muy compleja, con muchas variables. En esos casos la dificultad del problema es el tiempo. El éxito de la evolución es haberse producido en un tiempo tan corto, haber conseguido los objetivos de optimización muy pronto sobre un espacio de búsqueda extraordinariamente grande.

Pero el mecanismo sólo funciona cuando se dan dos circunstancias: la primera es que la función debe ser optimizable. Esto debe tenerse en cuenta pues no todas las funciones lo son. Una función es optimizable cuando tiene varias soluciones posibles y sólo una de ellas es un máximo global. Las funciones no optimizables tienen solución única, o varias soluciones, pero sin diferencia de calidad entre ellas. Además, en el sistema tienen que darse una serie de condiciones, que se conocen como condiciones de *mecánica natural darwiniana* [17] ya que todas ellas fueron claramente enunciadas y explicadas por Darwin en su obra *El origen de las especies* [18, caps. 3 y 4]. Teniendo en cuenta todo esto, no es de extrañar que en algunos casos veamos que la selección natural opera y en otros no lo hace, pero eso no es porque sea una teoría ambigua o inconsistente como algunos piensan, incluido Popper [15, pp. 236-259; 16, pp. 225-242].

La teoría de la selección natural predice que la selección natural no puede operar en ciertos casos, pero esa misma teoría también dice, que cuando se trata de una función optimizable y en el sistema se dan las condiciones necesarias, la selección natural tiene que funcionar obligatoriamente, y la evolución del sistema debe encontrar el máximo buscado en un tiempo razonablemente corto, de manera que se trata de una teoría consistente con predicciones teóricas, susceptibles, en principio, de ser comprobadas experimentalmente. Los nuevos datos conocidos sobre la selección natural nos permiten considerar de nuevo la pregunta de Popper: ¿es posible diseñar un experimento cuyo hipotético resultado negativo pudiese demostrar que la teoría de la selección natural es falsa?

Aquí la respuesta es claramente afirmativa. Ya lo hemos razonado, pero además, lo cierto es que ese experimento ya se ha hecho y el resultado ha sido positivo. Lo hizo el grupo de Manfred Eigen, en Austria, en 1988 estudiando la evolución de virus [19, 20]. Esto coloca a la selección natural en un *status* equivalente a un teorema con solución analítica. Debemos citar también aquí los trabajos de nuestro grupo en la Universidad de La Laguna, con la colaboración de los profesores Francisco Montero de la Universidad Complutense de Madrid, Reinhart Heinrich de la Universidad Humboldt en Berlín, y Thomas Waddell de la Universidad de Tennessee en Chattanooga. En los últimos años hemos demostrado que el mecanismo de optimización de la selección natural funciona con idéntica eficacia a nivel molecular, en el diseño de las rutas metabólicas [21-26] y en el diseño de la estructura de las moléculas [27-29].

Popper propone otra prueba adicional: las ciencias, a diferencia de las prácticas esotéricas, progresan, y eso se demuestra en que las preguntas que se hacen son diferentes a medida que se desarrollan [15, p. 262]:

"Una de las cosas que exigimos a una buena teoría es el carácter progresivo que se descubre con la discusión crítica: la teoría es progresiva si la discusión muestra que realmente da lugar a ciertas diferencias respecto al problema que queremos resolver; es decir, si los últimos problemas que han surgido son distintos de los viejos".

Los problemas o preguntas que surgen de una teoría son realmente una síntesis de su contenido contrastado con el campo de acción que pretende explicar. Por eso, esta prueba es concluyente. En las actividades esotéricas y metafísicas no se produce ese progreso, mientras que cualquier teoría científica, desde la gravitación universal a la selección natural no ha cesado de hacerse preguntas desde su formulación inicial, y éstas han sido diferentes a medida que progresa la investigación en esos campos.

* * *

Me gustaría terminar esta primera parte con un dato sobre la selección natural y la teoría de la ciencia, que me parece muy ilustrativo. Darwin (1809-1882) no pudo obviamente conocer las ideas de Popper, quien nació 20 años después de su muerte, pero tenía muy claro el concepto de que la ciencia es doctrina refutable. Lo que en lenguaje vulgar llamamos "darle pistas al enemigo", algo que es estúpido hacer en la vida cotidiana, debe, sin embargo, ser práctica obligada en la ciencia. El capítulo 6 de *El origen de las especies* [18], titulado *Las dificultades de la teoría*, reúne un compendio de problemas y posibles refutaciones de la teoría de la selección natural. Es particularmente significativo el párrafo siguiente en el cual propone un test para refutarla:

"Si pudiera demostrarse que ha existido un órgano complejo que se formó sin modificaciones ligeras numerosas y sucesivas, vendría al punto al suelo toda mi teoría"

Segunda parte.

Los problemas de la ciencia

En 1912 Bertrand Russell escribió una de sus obras más notables: *Los problemas de la filosofía* [4]. Era una revisión, puesta al día, de la filosofía, presentada en forma de una colección de 15 problemas o preguntas que se hacían los filósofos. Yo creo que lo más atrayente de esta obra es su planteamiento estético: expresar el contenido actual, las fronteras del conocimiento y los retos del futuro de una disciplina de una forma tan sencilla, sucinta y sintética, como una colección de *problemas*.

Me propongo presentar así este trabajo. No quiero darle por ello un carácter ‘problemático’. Hablo de “los problemas” en un sentido puramente estético y dialéctico, como una forma de hacer una presentación del mundo de la ciencia para contribuir a su arreglo y discusión. No pienso al escribir esto en ninguna ciencia en particular, sino en los problemas de la actividad científica. Traeré ejemplos, siempre que los necesite, para ilustrar un concepto, pero sólo como puntos de apoyo para pasar por sitios difíciles; es lógico, pues, que acuda más veces a la biología, y a la bioquímica en particular, porque conozco mejor ese terreno, no porque en otros sitios no pueda haber ejemplos igual de buenos.

Puesto que la ciencia es el progreso del conocimiento de la Naturaleza y esto es uno de los condicionamientos más básicos y más tangibles del progreso de la humanidad, es casi imposible que cualquier problema de ésta no tenga relación con la ciencia y sus problemas. De manera que en cierto modo, un análisis de los problemas de la ciencia reflejará nuestro momento histórico. Reconozco lo ambicioso de esta empresa, pues tratar este tema me llevará inevitablemente a un diagnóstico sobre la actualidad de uno de los aspectos más cruciales de nuestra sociedad.

Muchos gobernantes, quizá por un lamentable desconocimiento de la ciencia, a la que a veces consideran como algo no demasiado diferente de lo esotérico, tienen mucha culpa, y muchos de los grandes problemas de la ciencia son consecuencia de una mala política científica, o de ignorar que un adecuado desarrollo de la ciencia (empezando por la educación científica de los niños y jóvenes) ayudaría mucho al desarrollo de otros aspectos de la sociedad. Pero hay también otros problemas cuyos causantes principales son los mismos científicos. Son éstos, problemas que están dentro de la ciencia misma, demostrando que la propia ciencia genera problemas internos. Yo creo que también aquí una política científica bien organizada podría ayudar a resolverlos, de la misma forma que muchos aspectos de la convivencia pueden mejorarse si los políticos promulgan leyes acertadas.

He seleccionado doce problemas. La selección y clasificación pueden ser un poco arbitrarias, porque algunos pueden ser consecuencia de otros, y también algunos son más bien grupos de problemas, pero al menos esta presentación puede servir como punto de partida para una discusión que creo muy necesaria.

Problema número 1.—La ciencia creativa. ¿Cómo avanza la ciencia?

La ciencia que se produce cada día, cada año o cada decenio puede ser más o menos interesante, más o menos útil y más o menos esperada, pero independientemente de todo eso, desde el punto de vista de su aportación fundamental al conocimiento de la Naturaleza puede ser ciencia creativa o ciencia descriptiva.

Voy a empezar reconociendo que la ciencia no creativa también es necesaria, pues no basta abrir caminos, luego hay que organizarlos y hay que recorrerlos para conocer bien los nuevos terrenos, pero hay un punto de calidad e interés científico entre ambas que debe ser admitido. Los grandes avances de la ciencia, el descubrimiento de nuevas propiedades de la Naturaleza, los produce la ciencia creativa.

Entonces, ¿por qué la ciencia creativa es un problema? ¿No son evidentes su necesidad y su importancia? ¿Acaso no se reconoce que todos los grandes genios de la ciencia que figuran en un lugar de honor en su historia, como Newton, Darwin, Mendel, Lavoisier, Einstein, Boltzman, Pasteur o Pauling, están ahí por haber hecho ciencia creativa? ¿Cuál es el problema de la ciencia creativa?

En principio, todos parecen admitir la necesidad y el valor de la ciencia creativa en todos los ámbitos, pero muchas veces esa declaración es sólo retórica. En general, cuando quien tiene que juzgarla se encuentra con ella no es fácil que la reconozca. El problema es que la ciencia creativa es una minoría y tiene muy poco peso en las decisiones políticas. Pocos investigadores admiten que la ciencia que hacen no es creativa, pero lo cierto es que la ciencia creativa es muy escasa, y que la práctica de la ciencia no creativa lo invade todo.

La ciencia creativa es un bien tan escaso que los responsables de la política científica y hasta muchos editores de las revistas de alto impacto, como *Nature* o *Science* están haciéndose incapaces de reconocerla cuando se les presenta. Muchos investigadores podrán reconocer que cuando han hecho aportaciones en ese sentido se han encontrado con grandes problemas de incomprensión desde la subvención del proyecto hasta la publicación de los resultados. Hay un exceso de ciencia descriptiva para la poca cantidad de ciencia creativa que se produce. En general, todos los programas de investigación y las revistas científicas declaran que darán prioridad a la ciencia creativa, pero a la hora de la verdad la mayoría no lo hace, de forma que los poderes de la ciencia contribuyen muy poco a su desarrollo. En general, los programas de política científica para subvencionar proyectos de investigación no están diseñados para acoger proyectos de ciencia creativa, sino más bien para proyectos descriptivos cuyos resultados deben asegurarse y relatarse antes de empezar el proyecto. ¿Qué novedad se espera descubrir en esos proyectos?

La ciencia creativa debería ser lo más apreciado de la ciencia y lo que contase con más apoyo. Sin embargo tiene muchos más problemas que la otra ciencia. La ciencia creativa es necesariamente débil porque se presenta repentinamente en un foro donde no tiene escuelas establecidas trabajando en ese terreno que la defiendan. Es blanco de las iras de *referees* incultos que no la entienden, que no están acostumbrados a leer trabajos de esa clase, y que en general están poco dispuestos a admitir ideas nuevas, quizá porque ellos no han hecho ciencia creativa y son incapaces de reconocerla. La ciencia creativa es débil, porque

cualquier teoría cuando empieza necesita muchos retoques, muchas vueltas a la rueda del conocimiento para ajustarla bien. Esa necesidad de ajuste es inherente a la ciencia, y ninguna idea nueva puede nacer sin que haya que ajustarla luego. La ciencia se construye paso a paso, y cada paso debe publicarse—con las reservas pertinentes, pero debe ser difundido—a fin de que pueda ser juzgado y criticado. Todo lo que acaba de nacer, aunque sea muy bueno científicamente y esté bien apoyado por teoría y empirismo, es débil, pero los referees se apoyan en esos argumentos para derribar cualquier idea nueva. Después los editores se dejan manipular aceptando esa torpeza, siendo así incapaces de gobernar sus propias revistas.

Cuanto más asentadas están las cosas, más fuertes se hacen, y menos consienten que aparezcan cosas nuevas. Esto que es un hecho general en la vida se aplica también en la ciencia. Cuanto más desarrollado está un concepto en la ciencia más fuertes se hacen los que lo dominan, y menos sitio dejan para nuevos hallazgos y teorías.

La carrera del progreso de la ciencia está llena de obstáculos. Es difícil descubrir cosas nuevas, es difícil construir abstracciones nuevas, es muy difícil publicar todo eso en un foro que tenga la repercusión que deseamos, y es también muy difícil que otros científicos, especialistas en ese campo lo acepten. Si los nuevos hechos son realmente trascendentes, si van a cambiar alguna parte del paradigma de la ciencia, entonces uno puede encontrarse con todo este aparato en contra. Así, el problema de la lucha contra lo establecido puede llegar a ser muy grave. Son, sin embargo, muy alentadoras las palabras de Cajal cuando escribió [5, p. 24]:

“Aún en las ciencias más perfectas, nunca deja de encontrarse alguna doctrina exclusivamente mantenida por el principio de autoridad. Demostrar la falsedad de esta concepción, y, a ser posible, refutarla con nuevas investigaciones constituirá siempre un excelente modo de inaugurar la propia obra científica. Importa poco que la reforma sea recibida con malévolas censuras, con pérfidas invectivas, con silencios más crueles aún; como la razón esté de su parte, no tardará el innovador en arrastrar a la juventud, que, por serlo, no tiene pasado que defender; a su lado militarán también todos aquellos sabios imparciales, quienes, en medio del torrente avasallador de la doctrina reinante, supieron conservar sereno el ánimo e independiente el criterio”.

Las viejas teorías se resisten. Desgraciadamente, la historia de la ciencia está llena de estos casos, y no hay disciplina que esté exenta de ellos. Algunos han sido breves y se han resuelto pronto, pero los hay que han durado siglos. Creo que aquí encaja bien una frase típica de las *películas del oeste* que decían los colonos americanos a los indios: “Puedes matarme a mí, pero detrás vendrán más, y serán tantos que no podrás detenerlos a todos.” El avance de la ciencia es a veces muy violento. Pero yo creo (o al menos lo espero) que ese avance no podrá detenerse.

La ciencia debe ser constructiva. A continuación del párrafo citado, Cajal remata estas consideraciones con una gran reflexión:

“No basta, sin embargo con demoler; hay que construir. La crítica científica se justifica solamente entregando, a cambio de un error, una verdad.”

En definitiva: siendo algo muy difícil que ocurre pocas veces—si es que ocurre—en la vida de un científico, en lugar de contar con el apoyo que necesita, por ser algo nuevo que tiene

que abrirse camino, la ciencia creativa tiene unas dificultades adicionales. Por lo general la ciencia creativa no se tiene en cuenta en los programas de investigación, en las áreas prioritarias, o en la dedicación de los fondos destinados a la ciencia de interés local. Un grupo de investigación donde se hace ciencia creativa es el mejor destino que podría tener un becario porque es donde más puede aprender lo que es y cómo se hace la ciencia. Pero en lugar de eso, por su falta de poder político, esos grupos son mal atendidos incluso en eso, y muchos doctorandos que trabajan ahí han de hacerlo sin becas. La ciencia creativa se hace en condiciones precarias.

Este problema es tan desolador que no voy a insistir más. Prefiero dejarlo así: descarnado. Que cada uno se haga sus reflexiones. Lo peor de todo es que muchas ideas nuevas no se llegan a reconocer, incluso cuando se imponen, de manera que la ciencia creativa podría no ser reconocida nunca, como decía William James:

"Cuando alguien describe un fenómeno nuevo la gente dice: *Eso no es verdad.*

Después, cuando es obvio que aquello es cierto, la gente dice: *Bueno, de todas formas eso no es importante.*

Y al fin, pasado el tiempo, cuando nadie puede negar su importancia, la gente dice: *Ya, pero eso no es nuevo.*

Problema nº2.—El carácter multidisciplinario de la ciencia de hoy

En los años sesenta se puso de moda la especialización en la ciencia. El extraordinario avance que se había producido en la primera mitad de nuestro siglo llevó a una crisis de valores y a un replanteamiento de lo que debería ser un hombre de ciencia de la época. Se decía entonces que el "espíritu renacentista", del hombre universal que en los siglos XV y XVI acumulaba todo el conocimiento de su época, era algo ya pasado, imposible hoy día. Se decía que aquéllos eran otros tiempos, que la ciencia ha avanzado tanto que nadie puede acumular tantos conocimientos, etc. Esto llegó a ser toda una corriente de pensamiento que ha invadido la mayor parte del estilo científico en los últimos 35 años.

Hoy, con la perspectiva de la historia reciente, hemos de reconocer que aquello fue un error. La ciencia no es una acumulación de conocimientos, sino ante todo una *organización de conceptos*, y mal pueden organizarse éstos en cualquier parte si se desconocen los de otras que son su base o su aplicación. Los dos niveles de la ciencia, el empírico y el abstracto, necesitan una consideración diferente en este punto. Hay que especializarse, pero la especialización sólo es necesaria en el nivel empírico porque las técnicas de obtención de datos lo requieren, y porque la cantidad de datos es tan grande y específica que hay que ser un experto para comprenderlos, pero en el nivel de abstracción debe hacerse todo lo contrario. No es posible la abstracción si uno piensa exclusivamente en el campo reducido de su especialidad. De manera que la excesiva especialización fue sólo una forma de ocultar la ignorancia de conceptos básicos, un mal recurso de comodidad de malos científicos... y esto ha promovido más el freno que el avance del conocimiento. Aquella excesiva especialización fue muy improductiva. No puede negarse que se produjo un desarrollo importante y muy detallado de muchas técnicas, y que se consiguieron muchos datos, pero en general, la ciencia avanzó poco.

Hoy la ciencia se hace grandes preguntas que no pueden resolverse desde el laboratorio particular de un investigador aislado. Cualquier pregunta interesante —como las que preconizaba Krebs—necesita la aportación de especialistas muy diversos, y el mayor esfuerzo que deben hacer los investigadores es conseguir comprenderse para pensar juntos en el mismo problema. Entonces, cada uno verá un aspecto diferente, de acuerdo con su formación, pero sólo con la colaboración de varios especialistas diferentes (matemáticos, bioquímicos, biofísicos, genéticos, químicos orgánicos, químico físicos, etc) pueden resolverse los problemas interesantes de la ciencia de hoy. Si pensamos en las preguntas de la bioquímica, por ejemplo, podremos comprobar que su respuesta es muy difícil si nos empeñamos en resolverlas sin salirnos de nuestra especialidad. Todo esto no debería ser un problema, sino una característica de la ciencia de hoy. Sin embargo, desgraciadamente, la formación de los científicos está más organizada en la línea de la especialización que en la de la ciencia general, y nuestro problema es el esfuerzo que debemos hacer al salirnos de nuestra posición cómoda para interaccionar con otros especialistas.

Es cierto que la ciencia hoy es muy difícil porque con su grado de desarrollo es capaz de hacerse preguntas muy complicadas, y que si uno no se especializa no puede profundizar, pero quienes organizaron la educación así, olvidaron que por más que uno se especialice, los grandes problemas de la ciencia no lo hacen y siguen siendo multidisciplinarios, de manera que la especialización nos aleja de los grandes problemas de la ciencia.

Las interacciones con otros especialistas no son fáciles. Esto es así por dos motivos: es difícil que diferentes especialistas de formación muy diversa se interesen en el mismo problema, y es difícil que dos especialistas de áreas muy diferentes puedan entenderse.

Analicemos cada uno de estos dos aspectos. Vayamos primero con la dificultad de entenderse. Cuando dos especialistas diferentes (por ejemplo, un biólogo y un físico) intentan hablar sobre un mismo problema, ambos descubren que apenas se entienden. Entonces, lo más socorrido es alegar un problema de lenguaje, y eso no es así. La dificultad no es un problema de lenguaje. El lenguaje es simplemente una herramienta de expresión. El problema sería de lenguaje si los dos manejasen los mismos conceptos aunque llamándolos de distinta forma, pero desde luego ese no es el caso. El problema es que cada especialista maneja conceptos y herramientas distintas. Las matemáticas no son meramente un lenguaje. Si un biólogo no se entiende con un matemático, eso no es un problema de lenguaje, pues no se arregla con un diccionario (como ocurriría si dos biólogos hablasen uno en chino y otro en francés), sino un problema de conocimientos cuyo arreglo sólo se puede conseguir estudiando cada uno los conceptos básicos del otro, hasta el nivel mínimo donde sea posible el entendimiento que necesitan. Un biólogo no puede decir: “yo no sé matemáticas, para eso están los matemáticos”, porque si no sabe matemáticas no podrá entenderse con un matemático y no podrán abordar juntos un problema. En realidad el problema es mucho más profundo: mientras los biólogos no estudien física y los físicos no estudien biología, esta discusión será imposible porque ninguno de ellos sabrá que existen problemas comunes.

El segundo problema es aún más dramático. Es muy difícil conseguir un grupo de especialistas diferentes suficientemente interesados en un problema como para que cada uno

CIENCIAS	QUÍMICA	BIOLOGÍA
Matemáticas	Química Física	Bioquímica
Física	Química Orgánica	Genética
Química	Bioquímica	Citología
Biología		Zoología

Figura 2. Diferentes niveles de abstracción en las ciencias.—En general un científico siempre está dispuesto a subir a un nivel más abstracto, y reconoce sin reparo su necesidad, aunque esa empresa tenga mucha dificultad para él, pero en general interesa poco bajar hacia niveles más cerca de la realidad.

haga una labor creativa y no sea un mero consultor para cuestiones específicas. Sólo reunir un equipo así puede llevar varios años. Ordenemos las ciencias por su grado de abstracción, poniendo la más abstracta en el nivel superior, como está representado en la figura 2. Cualquier científico de un nivel reconoce sin problemas la necesidad de interactuar con los niveles superiores, aunque le cueste esfuerzo. Pero en general no está tan convencido de hacer lo propio con los niveles inferiores, y suele tener poca disposición para adentrarse en ellos. Es fácil que un bioquímico se interese por las matemáticas, o por la física, pero es muy difícil encontrar un matemático interesado en la bioquímica, o un bioquímico interesado en la zoología.

¿Cuál es el motivo de esto? Probablemente el más importante es un problema de formación. Un matemático no puede estar interesado en la bioquímica si la desconoce. En general la cultura que suele tener un científico sobre ciencias menos abstractas que la suya es muy pobre. Por desgracia, desde hace muchos años los planes de estudios tienden cada vez más a suprimir las disciplinas que pueden abrir campos y cada parcela de la ciencia se encierra más y más en sí misma. Por ejemplo, en la carrera de biología se estudia química, física y matemáticas, pero en la de física no se estudia biología, ni en la de matemáticas se estudian física, química y biología. Las carreras se diseñan reconociendo la necesidad de lo más abstracto y considerando un estorbo lo más real.

Este problema particular es un poco ridículo por lo fácil que sería resolverlo: la carrera de química debe tener una asignatura de biología, pero no la que hay ahora, de cultura general biológica en primer curso, que es como una *maría* que deba uno quitarse de encima cuanto antes porque estorba—poco más que una repetición de lo que se estudió antes en COU—sino una asignatura donde se expliquen *los problemas de la biología*, en el último curso, o al final del primer ciclo, cuando los alumnos ya saben suficiente química y están capacitados para pensar con mente química en problemas interesantes de los seres vivos.

Muchos físicos, químicos y matemáticos suelen mostrar poco interés en la biología, porque consideran que su trabajo en ese campo sería trivial, limitándose a aplicar unos pocos conceptos básicos para obtener unos resultados de poca importancia, como averiguar el tamaño medio de las conchas de los caracoles. Quien piensa así tiene muy poca cultura científica (es asombroso que una persona que ha estudiado una carrera de ciencias tenga

una cultura científica general tan pobre; es asombroso que a quienes diseñan las carreras de ciencias no les preocupe la poca cultura científica que puede tener un físico que acaba la carrera con notas brillantes). En todas las ciencias hay problemas de todos los niveles de importancia, pero la biología está llena de problemas interesantísimos cuyo análisis haría las delicias de químicos, físicos y matemáticos, y de cuya solución pueden depender cuestiones importantes como el cáncer, el SIDA, la aterosclerosis, o la enfermedad de Alzheimer.

Los físicos, químicos y matemáticos pueden pensar, sin embargo, que la aplicación de su ciencia a otras menos abstractas es más bien una labor de ingenieros, pues esa tarea les desviaría de los problemas trascendentales de su ciencia. Entonces estamos cayendo de nuevo en lo que yo llamaría *el síndrome del filósofo*: la tendencia a irse hacia problemas cada vez más trascendentes alejándose cada vez más de la realidad, y en definitiva, marchándose de la ciencia.

Esto no ha sido así siempre, por fortuna. La historia de la ciencia nos muestra ejemplos de grandes científicos que han descendido a un nivel menos abstracto del de su formación original. Y entonces, han hecho descubrimientos importantísimos, lo cual puede aceptarse como una demostración empírica de lo que decimos. Uno de los ejemplos más representativos y clásicos es Louis Pasteur, el científico que más impulsó el desarrollo de la biología experimental en el siglo XIX. Él fue quien formalizó el concepto de la continuidad de la vida y demostró en el laboratorio que la vida no se originaba por generación espontánea; Él fue quien descubrió las enfermedades infecciosas y desarrolló uno de sus grandes remedios (la vacuna), con lo que consiguió combatir varias enfermedades, incluida la rabia. Realmente puede decirse con todo merecimiento que hay una biología antes de Pasteur y otra después de él. Pues bien, Pasteur era químico (doctor en física y química por la École Normale de París) y su inquietud por poner su ciencia básica al servicio de otras que estaban muy necesitadas de ella le llevó a darle un rigor a la biología equivalente a lo que Lavoisier había hecho cien años antes con la química. Hay muchos más casos, como Linus Pauling, (químico y físico) descubridor de la estructura espacial de las proteínas, del mecanismo catalítico de las enzimas, del fundamento molecular de las enfermedades genéticas, y de muchos otros conceptos fundamentales de la bioquímica; Francis Crick (físico) descubrió con James D. Watson (biólogo) la estructura del DNA; Illia Prigogine (físico-químico) desarrolló la termodinámica de procesos irreversibles y su aplicación a los seres vivos; Benoit Mandelbrot (matemático), descubrió la geometría fractal y su aplicación para explicar muchas de las estructuras de los seres vivos; todos ellos decidieron usar sus conocimientos básicos para explorar distintos aspectos de la biología e hicieron importantes descubrimientos en ese campo.

En muchas facultades de física y de matemáticas nos encontramos con departamentos llamados de "física aplicada" o "matemáticas aplicadas" ¿Significa acaso esto que la intervención de esas ciencias en campos menos abstractos se considera una actividad marginal? Me gustaría insistir que en una colaboración entre físicos, químicos o matemáticos con biólogos, no es el biólogo el único que puede beneficiarse, y que los demás no serían meros operadores para resolver problemas intrascendentes. El físico que no sale de su propio

ámbito hoy día podría quedarse con una ciencia muy pobre, pues en los laboratorios clásicos de física quedan ya pocos problemas interesantes. Stephen Hawking, uno de los físicos más importantes de este tiempo, ha reconocido este hecho y ha pretendido generalizarlo a toda la física al decir que dentro de poco esta ciencia ya no tendrá preguntas que hacerse. Esto quizá sea así en el laboratorio convencional, pero dice eso demuestra desconocer los grandes, y nuevos problemas de física que existen en los seres vivos.

La biología es una fuente inagotable de problemas interesantes. Me refiero a problemas que pueden implicar conceptos físicos y químicos nuevos, fenómenos que hoy constituyen nuevos paradigmas de la física, de la química y de las matemáticas, y que jamás se habrían podido descubrir en los laboratorios convencionales de química o de física, porque los sistemas que se estudian allí son demasiado simples. Esta idea ya fue expresada muy ciertamente por Erwin Schrödinger (1887-1961) físico austriaco quien desarrolló con Werner Heisenberg la teoría de la mecánica cuántica, cuando escribió [30, p. 119]:

"A partir de todo lo que hemos aprendido sobre la estructura de la materia viva, debemos estar dispuestos a encontrar que funciona de una manera que no puede reducirse a las leyes ordinarias de la física. Y esto no se debe a que exista una "nueva fuerza" o algo por el estilo que dirija el comportamiento de cada uno de los átomos de un organismo vivo, sino a que su constitución es diferente de todo lo que hasta ahora se ha venido experimentando en un laboratorio de física."

Illia Prigogine, premio Nobel de Química en 1972 por desarrollar la termodinámica de los procesos irreversibles, y su aplicación a los sistemas biológicos, ha insistido mucho en que los seres vivos son una fuente inagotable de material nuevo para químicos y físicos [31].

Si un químico, un físico y un matemático entrasen en una célula se quedarían abrumados al ver un mundo que jamás habrían sospechado, lleno de problemas interesantísimos cuyo análisis les llevaría a descubrir nuevas leyes físicas, químicas y matemáticas, muy difíciles, si no imposibles, de descubrir fuera de la biología, como la selección natural, las estructuras disipativas, mecanismos de catálisis específica; una industria química microscópica con miles de reacciones ocurriendo en el mismo compartimento sin que se interfieran entre sí; una química industrial superfina, sin reacciones secundarias indeseables, sin residuos; materiales extraordinariamente eficaces para atrapar partículas de polvo, para amortiguar el pH, o anticongelantes que permiten la vida a varios grados bajo cero; congelantes que promueven una congelación muy rápida permitiendo que los seres vivos se congelen sin que se destruya su estructura microscópica, y así puedan volver a la vida en el deshielo; procesos de autoorganización que operan durante el desarrollo, basados en sistemas de reacción-difusión; sistemas de reconocimiento y memoria mediante el desarrollo de redes neuronales; sistemas complejÍsimos con miles de variables que trabajan desempeñando una actividad rapidÍsima controlada, muy lejos del equilibrio, y que sin embargo son muy estables y no se colapsan; algoritmos que resuelven problemas muy difíciles de optimización combinatoria sin solución explícita, en un tiempo récord; estructuras fractales con algoritmos sencillos de construcción optimizada... En suma: una especie de mundo de ficción, pero que es real, que está ahí y del cual ya se conoce lo bastante para que su estudio sea posible y se puedan conocer sus leyes.

La ciencia de hoy tiene que ser multidisciplinaria porque tiene que volver a reconocer la necesidad de la abstracción. El extraordinario desarrollo tecnológico actual, llevado a la instrumentación científica, ha hecho posible recoger cantidades ingentes de datos, y muchos podrían caer en el error de que eso es la ciencia de hoy. Pero no es así. Sin la abstracción adecuada esos datos no rellenarán ni un solo hueco del conocimiento, y para procesarlos correctamente y avanzar en el desarrollo de nuevas teorías es necesaria la colaboración entre científicos de especialidades diferentes.

Problema nº3.—La ciencia inútil

Este es un problema grave, y quizá también el menos reconocido. También parece un problema tabú, porque no se habla de él, pero todos saben que existe. En realidad es un problema degenerativo porque refleja un grado de degeneración de la ciencia. Yo creo que este problema es el origen de muchos otros, y pienso que la administración podría hacer mucho para resolverlo y debería tener la valentía de afrontarlo.

El problema se resume así: sólo una pequeña parte de la producción científica que se hace hoy día en cualquier parte del mundo y en cualquier campo está aportando algo que realmente merezca la pena. Recordemos los pensamientos de Krebs: hay muchas preguntas, pero muy pocas que merezcan la pena ser resueltas.

La ciencia inútil con frecuencia se intenta justificar alegando que es “ciencia pura” sin una aplicación inmediata, pero necesaria, ya que está recolectando unos datos que nadie había determinado antes. Digámoslo ya: este razonamiento no tiene sentido. El conocimiento de la Naturaleza debe ser proporcional a nuestras necesidades. El hombre no puede empeñarse en intentar conocer la Naturaleza con todo detalle, sino con el detalle necesario para cada propósito. La obtención de cualquier dato científico es muy costosa en tiempo, dinero y ocupación de la mente de investigadores jóvenes que intentan formarse haciendo un trabajo que les enriquezca su mentalidad científica. Dedicar todo eso a la obtención de datos cuyo destino sea simplemente figurar en unas tablas de letra impresa, es un desperdicio que nuestra sociedad no puede permitirse, y es una estafa a quienes soportan económicamente ese trabajo y no tienen conocimientos para evaluarlo, y a quienes fueron a ese laboratorio pensando que iban a formarse. Tampoco se justifica esta actividad diciendo que otros vendrán después que usarán esos datos, porque lo cierto es que no hay datos absolutos, o éstos son muy pocos y muy abstractos (la velocidad de la luz en el vacío, la carga del electrón, y algunos más); en la mayoría de los casos esos datos no tienen aplicación posterior, pues se han obtenido en unas condiciones (temperatura, presión, pH, salinidad, etc) muy particulares y lo normal es que quien los necesite para un nuevo experimento tendrá que volverlos a obtener en sus condiciones particulares.

Mucha ciencia que se subvenciona, se hace y se publica (incluso en revistas de altísimo impacto) es ciencia inútil, ciencia que se ha hecho sin necesidad, que no contesta a ninguna pregunta y que no tiene ninguna repercusión. La gente de la calle, y los propios gobernantes que rigen el destino del dinero no son expertos que puedan distinguir una cosa de otra, pero algo se imaginan, y esto acaba produciendo un escepticismo general sobre la producción científica, y genera un engranaje de descrédito para la ciencia en general.

No se confunda la ciencia inútil con ciencia básica y la útil con aplicada. La ciencia tiene que ser útil siempre, si esa utilidad es primariamente para el progreso de la propia ciencia, es decir para impulsar el desarrollo de una teoría, entonces es ciencia básica. Si en la investigación para obtener un dato el fin último es sólo ese dato, entonces es inútil.

Este problema está muy relacionado con otros como el comentado arriba de la ciencia creativa, y otros que veremos más adelante como la política editorial de las revistas, y la política científica de los gobiernos, pero no es lo mismo que ninguno de ellos. Mucha ciencia no creativa es buena, pues hay que afirmar los caminos abiertos, y esto también es ciencia necesaria aunque sólo se trate de aplicar una rutina experimental.

Los gobernantes no muestran interés en corregir esta situación, pues las normas que dictan para evaluar la producción científica demuestran un desinterés total en este problema. Por otra parte, ellos hablan del dinero que se destina a la ciencia en abstracto, como si todo fuera igual de bueno. En general, las campañas para que se destinen más fondos a la investigación no son muy acertadas. Debería más bien pedirse que se destinen los fondos sólo a la buena ciencia. Quienes tienen a su cargo la evaluación científica tienen la responsabilidad de uno de los mayores problemas de la ciencia, de cuya solución depende todo lo demás. Un becario se formará muy bien y aprenderá mucho si está en un grupo donde se hace buena ciencia; un grupo que hace buena ciencia necesita personal auxiliar. Para conseguir que la ciencia progrese hay que empezar reconociendo cuál es la buena. ¿Qué se hace para resolver este problema? ¿Se reconoce al menos que existe? ¿Por qué se siguen subvencionando proyectos de ciencia inútil dedicándoles los mismos recursos o mayores que a los de buena ciencia?

Problema nº4.—Las modas

Cuando se ve que en la ciencia hay modas la única reflexión que uno puede hacer es reconocer que la actividad científica no está por desgracia exenta de los vicios de la conducta humana. Las modas científicas (¿hay algo más anticientífico que las modas?) condicionan subvenciones en áreas prioritarias, y producen un direccionalismo político de la ciencia porque los gobernantes —en general, mal aconsejados por asesores incompetentes— se dejan influir por ellas y confunden una moda científica con un problema científico actual.

En general, la moda es una de las actividades más frívolas e irracionales de las culturas; como ha dicho Antonio Mingote, “En la moda no hay disparates... hasta que se pasan de moda” [32]. Por desgracia, ninguna actividad humana está exenta de esta práctica, y esto incluye también la ciencia. Por eso, los responsables de la política científica, desde los gobernantes hasta los editores de las revistas, y por supuesto también los investigadores, no deben consentir que las modas dirijan su actividad.

Las modas casi nunca traen buena ciencia, buenas preguntas científicas, sino más bien la aplicación de nuevas técnicas experimentales que se abren en un amplio abanico, casi circular, para medir cualquier cosa, generalmente poco importante, con muchísima precisión, y usando medios muy caros. Los científicos con poca imaginación siempre están repitiendo que la ciencia sólo puede avanzar descubriendo técnicas nuevas. Yo pienso lo contra-

rio. No creo en absoluto que la capacidad técnica sea la única, ni siquiera la más importante, dificultad para el avance de la ciencia.

Sin embargo, las modas invaden los ámbitos de la ciencia: llegan a dominar la política científica, incluyendo los equipos de asesores científicos, y su influencia llega hasta los comités editoriales de las revistas científicas de mayor impacto. Por desgracia los responsables de la política científica en los tres niveles (Comunidad autónoma, Nación y Comunidad europea) han demostrado mucha servidumbre a las modas y en ellas suelen basar mucha—cuando no toda—la dotación de los recursos. Las modas determinan la concesión de proyectos de investigación, subvenciones generales, dotaciones de personal, becarios, personal auxiliar, y hasta construcción de edificios.

Las modas fomentan la mala ciencia. Son atractores extraños que desvían la actividad científica hacia aglomeraciones inútiles de recursos y esfuerzos, y que se mantienen estables durante un tiempo, como estructuras disipativas, obstaculizando el desarrollo de la ciencia creativa. Y este dominio se debe a la pereza de pensar; porque es cómodo, porque no seguir una moda es al fin y al cabo un acto de rebeldía, y para ser rebelde hay que tener ganas de luchar, además de ideas. Pero la historia de la ciencia es la historia de la lucha contra la pereza, contra el conformismo y contra la superstición. La ciencia tiene que ser inconformista. Uno no puede aceptar que la población quede diezmada por una epidemia o por un huracán. El hombre se ha propuesto no dejarse dominar por las fuerzas de la Naturaleza, y la ciencia es el único camino que puede seguir para lograrlo. Renunciar a la lucha es renunciar a la ciencia, y seguir una moda es dejarse llevar por las tendencias cómodas que no resuelven estos problemas.

Problema nº5.—La política editorial de las revistas científicas

Este es un problema muy complicado, quizá el de más difícil solución. En general, el científico se mueve entre dos límites: la subvención de un proyecto, para empezar una investigación, y la publicación de los resultados, para terminarla. Los gobernantes deciden que proyectos se han de subvencionar, pero por mucho que se haya hecho en la investigación, el trabajo científico no está terminado hasta que se publica. Los editores de las revistas tienen, pues, la última palabra.

La política editorial de las revistas es lo que en realidad dirige la política científica, más incluso que los gobernantes que tienen a su cargo la administración de los recursos. A la postre, los gobernantes dependen de los editores de las revistas científicas. Aquellos pueden declarar una serie de áreas de interés, pero si a los editores de las revistas más importantes no les parecen interesantes esos resultados no los publicarán, y los resultados del proyecto, por mucha subvención que haya tenido éste, tendrán muy poca trascendencia. Además, por mucho interés que pueda tener un gobernante en un área determinada siempre tendrá que someter los proyectos a evaluación antes y después de subvencionarlos. Si el investigador que presenta ese proyecto no es capaz de acreditar su calidad con artículos sobre el tema publicados antes en buenas revistas, no tendrá posibilidades. De manera, que los gobernantes están supeditados—aunque no quieran o no lo sepan—a las di-

rectrices de política científica que marquen los editores de las revistas, quienes por este motivo, no sólo tienen la última palabra, sino también mucho peso en la primera.

Prácticamente toda la ciencia de hoy, a excepción de ciertas publicaciones de interés local, y artículos de divulgación dirigidos a un público no especialista, se publica en inglés, con independencia de la lengua madre de los autores, del país donde se ha producido esa ciencia, e incluso del país donde se publica la revista en cuestión. En los albores de la ciencia cada país—incluso cada ciudad y hasta cada laboratorio—editaba sus propias revistas para publicar en ellas los resultados producidos allí. Aquellas revistas parecían destinadas más al servicio de los autores que de los lectores. Algunas revistas actuales como el *New England Journal of Medicine*, o el *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* han sobrevivido después de muchos años, y aún mantienen un nombre local. Al contrario, muchas otras que también han sobrevivido han cambiado de nombre quitando alusiones locales y transformándose al inglés. Hoy la ciencia se publica de otra forma. En cualquier país, cualquier revista publica artículos procedentes de cualquier parte del mundo. Los investigadores no eligen la revista en donde desean publicar sus artículos por cercanía geográfica, sino según la especialidad y la calidad que ellos piensan que tiene su trabajo: si consideran que éste es muy bueno eligen una revista muy buena. La calidad de las revistas se mide cada año por una compañía especializada en estudios de difusión. Esta sociedad publica anualmente los *índices de impacto* de todas las revistas que se publican en el mundo a partir de un cierto nivel [11]. En general, cuanto más alto es el índice de impacto de una revista más difícil es publicar en ella.

La política editorial de la ciencia en el mundo está dominada por dos países: Estados Unidos, y el Reino Unido. Esto no significa necesariamente que ellos estén a la cabeza de la producción científica mundial, pero sí a la cabeza de quienes deciden lo que es ciencia. Cualquier revista americana o inglesa de cualquier índice de impacto publica artículos producidos en cualquier país del mundo.

En general, a los editores de las revistas les importa poco publicar más o menos artículos de un país en particular, pues lo que les interesa es asegurar, mantener y mejorar si es posible el nivel de calidad. Con esto no quiero decir que los editores juzguen con la misma medida todos los artículos sin importarles de dónde vengan; desgraciadamente no es así. Cuando un artículo procede de un laboratorio muy afamado tiene menos dificultades para ser publicado que si procede de un sitio con poca tradición de producción científica. Este es otro problema muy grave que produce un retraso injusto en el desarrollo científico de países como España.

Después de Estados Unidos e Inglaterra, a bastante distancia, tienen también cierta importancia Canadá, Alemania y Holanda (siempre con revistas publicadas en inglés, y siempre publicando artículos de todas las procedencias, no hay que insistir en eso). En un tercer grupo más distanciado hay algún otro país, como Suiza, Italia o Suecia, pero sólo en algunas áreas. Japón, país muy influyente en la economía (las crisis de la bolsa de Tokio y la cotización del yen tienen gran repercusión mundial) no es una gran potencia en la política editorial científica; la ciencia que se publica allí es mayoritariamente, si no toda, ciencia producida en Japón, es decir, las revistas japonesas publican en inglés artículos escritos

por japoneses que leen principalmente los japoneses (curiosas rarezas de la ciencia). Japón es, sin embargo el país que dedica a la investigación científica el mayor porcentaje del PIB, y produce mucha ciencia, pero su influencia en la política editorial es pequeña (la mejor ciencia que producen los japoneses se publica en Estados Unidos e Inglaterra). Prácticamente lo mismo le ocurre a Rusia. Francia, un país muy influyente en muchos otros terrenos, y con un nivel alto de producción científica, es poco influyente en el campo de la política editorial de la ciencia, y posiblemente debe este desfase a la política lingüística del general De Gaulle, quien fue presidente de la república entre 1959 y 1969, al intentar hacer del francés una lengua científica tan corriente como el inglés, destinó muchos fondos a subvencionar la publicación de la ciencia en francés, y lo que consiguió en realidad fue rebajar la influencia científica de Francia en el mundo, y no mejorar su influencia en la política editorial.

El fanatismo lingüístico es muy peligroso en la ciencia hoy. Es importante y necesario publicar ciencia en la lengua corriente de cada país, pero sólo para divulgarla entre el público, no para publicar resultados y discusiones especializadas. Los gobiernos de algunas comunidades autónomas de España, como Cataluña y Valencia, están promoviendo la publicación de artículos y libros científicos en catalán y deberían recapacitar sobre esto, porque pueden caer en el mismo error, y con ello pueden estar malogrando el desarrollo científico de su región.

España cuenta muy poco en el terreno de la política editorial, quitando alguna excepción honrosa, como el *International Journal of Developmental Biology*, una revista con un buen índice de impacto mundial, editada por la Universidad del País Vasco y, por supuesto, escrita en inglés, que publica artículos procedentes de cualquier país del mundo.

No soy un apasionado del inglés y creo que al escribir esto no estoy haciendo una defensa de esa lengua, ni un menosprecio a todas las demás. Supongo que no será necesario aclarar que a mí me gustaría que fuese el español, en lugar del inglés, la lengua de la ciencia. A todos, lógicamente nos gustaría que fuese nuestra lengua la más importante en este campo, pero debemos vivir de realidades, no de ilusiones. Hay que difundir la ciencia en el lenguaje que todos puedan entender. La difusión impresa es muy cara y hacerlo en lenguas desconocidas para la mayoría de la gente a quien va destinada es tirar el dinero.

Las revistas son costosas y no pueden sobrevivir solas. Así, en Estados Unidos, muchas de las revistas más afamadas se subvencionan cobrando una cuota a los autores de los trabajos publicados (y así, cumpliendo la ley, en todos los artículos, se especifica que, puesto que sus autores contribuyen a los costos de publicación, esos artículos científicos deben ser considerados como "anuncios publicitarios"; este es otro de los aspectos ridículos de la ciencia). En muchos países la edición de las revistas científicas está subvencionada por el gobierno. En general, todas las revistas científicas deberían estar subvencionadas en mayor o menor grado, pues ésta es una forma muy eficaz de subvencionar la ciencia, lo cual debe ser un deber de todos los gobiernos del mundo. Hay dos formas de subvencionar la edición de revistas: con una buena dotación a las bibliotecas para suscripciones (es bien sabido que las suscripciones son lo más básico para la supervivencia de una revista), y

subvencionando directamente la edición. Las dos formas son buenas y ambas deben practicarse, porque cada una cubre una parte diferente del problema.

Es importante promover la edición de revistas científicas en España si queremos tener una influencia en ese mundo. No se trata de hacer revistas nuevas para publicar la ciencia que se hace aquí (eso no hace falta, y además es contraproducente), sino para que España participe en la política editorial—o sea, en la política científica— mundial. El gobierno español debe promover la publicación de revistas españolas que deberían acoger ciencia de gran calidad, sea su origen español o no. No es una aberración que el gobierno español subvencione la publicación de resultados de grupos extranjeros; si eso ocurriese, los editores españoles se habrían convertido en árbitros de la ciencia como hoy lo son los ingleses y los americanos. No podemos decir “¡Que publiquen ellos!”

¿Qué revistas podrían crearse en España? ¿Hay sitios disponibles en el mercado? La respuesta a la última pregunta es desde luego sí. A pesar de la enorme competencia hay mucho espacio disponible. Muchos investigadores que producen buena ciencia están un poco hartos de la política editorial de las revistas de alto índice de impacto, como *Nature* o *Science*, cuya posición las hace cada vez más caprichosas, y el mercado está pidiendo a gritos una revista equivalente sin todos esos resabios. Esto es un ejemplo muy claro. Otra posibilidad es empezar con una revista de una ciencia muy desarrollada en España, como la bioquímica, no para descargar las revistas internacionales de la literatura española (que bien está allí), sino porque una operación de esta envergadura debe hacerse en un terreno donde España sea fuerte.

Vayamos a otro aspecto del problema. Cuando uno conoce la forma de trabajar de revistas de altísimo índice de impacto como *Science* o *Nature*, cómo seleccionan lo que va a figurar cada semana como lo más importante del avance científico, se suele llevar una decepción sobre el presente y el futuro de la ciencia. Lo que se supone que es la vanguardia de la ciencia, el último sitio en donde uno esperaría encontrar una mentalidad conservadora, resulta muy decepcionante en este sentido.

Hay una excesiva cautela de los editores, quienes son mucho más propensos a no arriesgar ideas nuevas para no correr el peligro de perder un *status*. Se nos está haciendo habitual padecer el retraso de más de un año en publicar nuestros resultados porque los editores o los referees no se los creen y dudan de su validez. Es comprensible que hay que ser cauto, pero el exceso de cautela lleva a veces a frenar en exceso el desarrollo de nuevas ideas. Lo que hemos dicho arriba sobre este punto, en “Las cualidades que debe tener el científico” es extensible a los editores de las revistas. ¿Cuál es la causa? Quizá las buenas ideas son tan escasas que rechazarlas todas *a priori* es mucho menos arriesgado que aceptar alguna de ellas. Algo no funciona en el engranaje de la política editorial.

Hablemos también de la incompetencia de los referees. Esta es una historia triste y a veces grotesca de la que citaré tres ejemplos de tres ocasiones en las cuales los expertos negaron el interés de algo que luego resultó ser un material excepcional: el proyecto de Colón que llevó al descubrimiento de América fue rechazado por dos comités de expertos, en Portugal y en España, respectivamente, a pesar de lo cual la reina Isabel I de Castilla, llamada *la católica*, decidió financiarlo por su cuenta; el artículo de Krebs describiendo el ci-

clo que lleva su nombre, ruta central del metabolismo, fue rechazado a vuelta de correo por el editor de la revista *Nature*, sin llegar a mandarlo a referees, y se publicó en *Enzymologia*, una revista muy especializada y de mucha menos difusión; la compañía discográfica inglesa *Decca Records* rechazó el contrato que le ofrecieron los Beatles, después de hacerles una prueba de varias horas en el estudio, y algunos meses más tarde, la compañía *Parlophon* les contrató sólo con escuchar una maqueta.

¿A quién no le han rechazado un artículo por el informe de un referee que no ha comprendido el trabajo? Este es un problema que muchos editores no saben valorar en su justa medida, pero las revistas de más solera, tradición e impacto llegan a estar dominadas por referees perezosos que están permanentemente evitando la publicación de cualquier cosa que pueda cambiar lo que ya se acepta. Hablo por experiencia propia, conociendo a referees y editores, con experiencia positiva y negativa en estas lides, como autor, como referee e incluso como editor-consejero de revistas internacionales. Es imposible no tropezar con este problema. ¿Qué hacen los editores ejecutivos para combatirlo? Yo a veces creo que muchos de ellos lo desconocen.

Ya dije antes que las modas son otro problema de la política editorial, pues las grandes revistas tampoco están exentas de esa desgracia. En este punto la responsabilidad de los editores no es menor que la de los políticos: unos hacen posible que se empiece una investigación, y otros hacen posible que se termine. El investigador se mueve entre los dos, encontrando muchas veces los mismo problemas al principio y al final.

Problema nº6.—La organización de la enseñanza de la ciencia

Este es un problema principalmente político, ya que es labor de la ciencia darle un contenido a cada parte, pero es labor política estructurar todos esos conocimientos para confeccionar un *currículum* que va a tener un valor legal. Sin embargo, como asesores, varios científicos tienen también mucha culpa; además, en muchos ámbitos, la ciencia se enseña según unos planes de estudio confeccionados principalmente—o exclusivamente—por científicos, de forma que los políticos tienen mucha responsabilidad, pero no toda.

La ciencia se estudia sin orden. La confección de los planes de estudios universitarios—cuyas partes básicas están promulgadas por leyes del Gobierno—suele hacerse con muy poca seriedad: en lugares destacados aparecen ciencias nuevas, sin apenas contenido, y, al contrario, no están otras que han alcanzado un grado altísimo de desarrollo (enseñada daré ejemplos). Esto confunde a los alumnos, pues, por lo general, cuando ellos empiezan a estudiar ciencias, ante el extenso abanico de posibilidades que se le ofrecen eligen basándose en un deseo. Y aquí estamos en lo que decía Asimov: “la gente se mueve más por deseos que por realidades” [33], idea en la que coincide con Russell, quien afirma “Los seres humanos encuentran difícil, en todas las esferas, basar sus opiniones más en pruebas que en las propias esperanzas” [6, pp. 48-49]. En los últimos años se han creado en España carreras como las “ciencias ambientales” más porque es un deseo de nuestra época que porque tengan suficiente contenido. No se puede crear una carrera universitaria, simplemente porque nos gustaría que existiese, ni es suficiente para ello reunir una serie de ma-

terias que ya existían con otros propósitos que puedan estar más o menos relacionadas con un objetivo nuevo; algunas de ellas podrían servir como materias de apoyo y de base, pero una carrera nueva necesita disciplinas propias que marquen su identidad. Por la misma razón, no todas las asignaturas pueden tener la misma importancia en una carrera.

En general, un estudiante que va a comenzar sus estudios en la universidad elige su carrera basándose sólo en el deseo, y esto es peligroso dadas las características de los estudios universitarios en España, porque luego podría quedarse en una ilusión, que se rompe a media noche, como el encanto de la cenicienta. Desgraciadamente en nuestras universidades hay varias carreras que se suponen de ciencias sin apenas contenido científico, pero los alumnos las eligen creyendo que van a aprender muchas cosas allí porque confían en que si esa carrera existe, los gobernantes que la han puesto y todos esos profesores que se la van a explicar no pueden estar equivocados ni estafarles; sin embargo, a veces ocurren ambas cosas. También, en muchas facultades de ciencias vemos especialidades ilusorias. Por lo general, ninguna carrera por muy dura que sea está exenta de asignaturas que son más una ilusión que una realidad.

Deberíamos reconocer el nivel de desarrollo de cada disciplina y colocarla en su justo sitio. Una materia puede ser muy atractiva, y muy necesaria desde el punto de vista social o científico, pero si todavía no tiene contenido (hechos importantes reproducibles y teorías que los expliquen, que se hayan desarrollado con esos hechos, y que hayan demostrado su capacidad predictiva) no debe ser una asignatura, y menos una carrera o una especialidad, sino un programa de investigación más propio para cursos de doctorado, a fin de preparar especialistas que vayan explorando ese terreno, porque eso sí es necesario. No estoy, en absoluto, menospreciando las ciencias que empiezan. Al contrario, a ellas debemos nuestro máximo respeto y nuestros mejores e ilusionados deseos. Todas las ciencias tuvieron un momento así, pero cuando se trata de transmitir conocimientos y de presentar una expectativa profesional hay que distinguir qué contenidos de la ciencia están en condiciones de ser expuestos en cada foro.

El conocimiento de una ciencia obliga a conocer su situación y a hacer un diagnóstico de cómo está compensado su contenido en los dos niveles. Toda ciencia debe tener un contenido teórico (matemático). Esto a veces es largo y laborioso, pero si después de muchos años de desarrollo no ha logrado tenerlo debería considerarse un fracaso. Por ejemplo, muchas disciplinas biológicas tienen demasiados datos, y así tienen descompensada la cantidad de datos empíricos con la poca integración que se hace con ellos, pues hay pocas teorías para tantos datos. Un ejemplo de esto es la biología del desarrollo. El problema llega incluso a las partes más compensadas de la biología, como la bioquímica. El mejor ejemplo de esto es la regulación del metabolismo. La investigación en este punto empezó prácticamente a mediados de los años sesenta, y con tal ahínco que desde entonces acá se han obtenido muchos miles de datos. Sin embargo, a excepción de unos pocos casos triviales, todos se han obtenido independientemente; ni uno sólo de ellos se ha podido deducir teóricamente de todos los demás. Esto demuestra la necesidad imperiosa de una teoría de la regulación del metabolismo, sin la cual será imposible comprender las enfermedades degenerativas.

También existe el problema contrario, y tan mala es una cosa como otra. La parte de la biología más descompensada en el otro sentido es la ecología; esta disciplina es aún muy incipiente—a pesar de que el nombre existe desde hace muchos años, y a pesar de que todo el mundo desearía que estuviera muy desarrollada, y de que muchos hablan de ella como si fuese la culminación de la ciencia, eso no pasa de ser un deseo. La ecología tiene pocos datos en su haber porque es muy difícil hacer observaciones reproducibles en la Naturaleza en el sentido global que le es propio a esta materia, de manera que el número de datos que tiene una ciencia no depende de que se ocupe de un campo amplio, sino de su grado de desarrollo, es decir, de los hechos, no de los deseos. Esto ha promovido una superproducción de teorías, lo cual la coloca en una posición peligrosa, más cerca de la filosofía que de la ciencia. La ecología tiene muy pocos datos experimentales porque es muy difícil hacer un experimento controlado en sistemas tan complejos, y es muy difícil determinar la importancia de cada variable en sistemas que tienen miles de ellas. Es difícil seleccionar variables cuando de muchas se desconoce incluso que existen. La dificultad experimental en ecología es tan grande que prácticamente, cada experimento nuevo que alguien consigue hacer en esa materia es una noticia de primera página en revistas como *Nature* o *Science*, y trasciende fácilmente a la prensa diaria y semanal. Los ecólogos tratan de paliar este defecto con experimentos simulados con ordenador, lo cual no es una buena solución. El ordenador es desde luego una magnífica herramienta para un biólogo, pero no puede estudiarse la Naturaleza sólo simulándola en una pantalla, como no se puede estudiar cirugía sólo con modelos de plástico.

No quiero con eso establecer criterios de importancia general. Bienvenidas sean las nuevas disciplinas, pues eso demuestra que la biología—y la ciencia, en general—está viva, pero es primordial a todos los efectos reconocer el grado de desarrollo de cada una. En los tiempos de Galileo un texto de física tendría muy pocas páginas; en los tiempos de Mendel la genética no existía, y tuvieron que pasar muchos años después de sus experimentos—y aún después de redescubrirlos—para que su contenido ocupase tratados de varios miles de páginas, y pudiese ser presentada en público. No tener en cuenta esas diferencias confunde a los estudiantes.

La mayor preocupación actual en nuestra lucha contra el sufrimiento es el dominio de las enfermedades degenerativas. Muchas de esas enfermedades se deben a fenómenos de autoinmunidad. La inmunología es la parte de la biología que sin duda se ha desarrollado más en los últimos años; tiene datos, teoría, aplicaciones; ha demostrado empíricamente sus conclusiones; ha resuelto muchos problemas importantísimos... pero a efectos académicos no figura en los planes de estudios de biología como materia básica. Nosotros la hemos puesto en el nuestro, en la Universidad de La Laguna, y me cabe la satisfacción de haber sido quien la propuso, y uno de sus más aferrados defensores, pero no figura en las normas generales promulgadas por el gobierno, y ya quisieran muchas asignaturas que sí figuran allí, desde hace varios decenios prometiendo ilusiones, tener el grado de madurez que ha alcanzado la inmunología en tan poco tiempo.

Los cambios que se producen en la ciencia deben repercutir en los planes de estudios. Las ciencias viejas deben ser sustituidas por las nuevas. Una ciencia envejece cuando deja

de tener problemas, así que la mejor forma de demostrar que una ciencia está viva es presentar una colección de problemas importantes. Creo que todos deberíamos reflexionar, y ver si somos capaces de enunciar los diez o doce problemas de nuestra ciencia, de nuestra especialidad, de nuestra línea de investigación, etc. Deberíamos todos los años dedicar al menos una clase para presentar los problemas de nuestra disciplina a nuestros alumnos, según la estética de Bretrand Russell que yo pretendo seguir ahora. Es un magnífico ejercicio mental que renovará nuestras ideas y un reto a nuestra cultura científica y a nuestra capacidad de abstracción. Al hacerlo nos llevaremos alguna sorpresa y podremos hacer un análisis crítico sobre la trascendencia, utopía y solucionabilidad de esos problemas.

El que una determinada ciencia no tenga hoy problemas importantes no la descalifica como ciencia, ni significa que deba desaparecer de un plan de estudios de ciencias— aunque si se trata de una ciencia muy antigua y nunca los ha tenido es ya más grave. Una ciencia bien hecha, con teorías consistentes bien probadas empíricamente, como la geometría de Euclides, o la cristalografía básica, aunque ya se haga pocas preguntas, no es inútil; al contrario, es una herramienta muy práctica para muchas otras actividades, y es un acervo cultural importante sobre la Naturaleza, porque aunque en sí misma no se haga preguntas, los conocimientos que aporta sirven para apoyar otras ciencias, y ayudan a generar preguntas nuevas en otros campos. Por eso debe mantenerse en el plan de estudios, pues es un campo del conocimiento necesario para la formación de nuevos científicos; pero su situación allí, y su forma de exponerla debe ser diferente de las que tienen preguntas actuales. En una carrera universitaria cabe todo, y debe haber sitio para todo, pero cada disciplina debe tener el sitio que le corresponde al margen de presiones políticas y doctrinas demagógicas del momento. La mayor desorientación que sufren los alumnos durante el estudio de una carrera de ciencias es que esas diferencias tienen que descubrirlas ellos y a veces la enseñanza es tan embrollada que muchos estudiantes acaban la carrera sin enterarse ni siquiera de que existen esas diferencias entre las distintas partes de la ciencia.

Problema nº7.—La desinformación científica.

En general la gente de la calle no tiene una idea clara de lo que es la ciencia, y carece de los conocimientos científicos más básicos.

Los órganos del estado contribuyen poco a desarrollar la educación científica de la población. Los gobiernos plantean la ciencia en los planes de enseñanza como una opción tan respetable como cualquier otra. En la enseñanza media se les ofrece a los jóvenes la posibilidad de estudiar ciencia o no, como si fuera una opción religiosa o política, o como si la ciencia pudiese ser una cuestión de opinión, y en consecuencia, su estudio, una cuestión objetable. Esto hace mucho daño, pues crea perplejidad y escepticismo en el ciudadano medio sobre el valor de la ciencia. Si el gobierno, que se supone que es sabio en todo, piensa que la ciencia puede ser buena o no, necesaria o no, y organiza enseñanzas con y sin ciencia, dándoles a todas el mismo valor, la gente puede pensar que las cosas no deben estar tan claras. Este es, pues, principalmente un problema político, probablemente derivado de la pobre cultura científica de muchos gobernantes. Así, quienes tienen a su cargo la

responsabilidad de legislar la organización de la enseñanza se convierten en el vehículo oficial de la desinformación científica.

A esto se añade una labor nefasta de muchos medios de comunicación cuyos artículos editoriales y de opinión están dominados por escritores con escasa cultura científica y que con frecuencia hacen alarde de un odio incontinido a la ciencia, pero escriben sus artículos con modernos ordenadores, los envían por e-mail al periódico, y disfrutan de un sinfín de comodidades que no podían existir cuando aún no se había desarrollado la ciencia.

La televisión y otros medios estatales y privados (poco importa la diferencia a estas alturas, pero se me antoja que es más grave cuando el medio es estatal) dedican mucho espacio a fenómenos pseudocientíficos anticientíficos y esotéricos, como el ocultismo, los horóscopos, la adivinación del futuro, la astrología, etc. y muy poco o nada a la ciencia.

Muy pocos medios de difusión dedican espacios fijos a dar noticias de la ciencia y a comentarlas con seriedad, y las pocas veces que lo hacen las notas breves suelen estar llenas de errores. Es muy difícil leer una noticia científica o un comentario sobre esa noticia en un periódico, escrita de forma que muchos puedan entenderla sin ser especialistas, y que los especialistas puedan leerla sin espantarse por los errores graves que contiene.

Algunas veces parece como si los periodistas tuviesen *miedo a la ciencia*. En la televisión pasan las noticias científicas importantes a todo correr, en muy pocos segundos, y dedican mucho tiempo a cuestiones estúpidas...

En no pocas ocasiones, los que salen en los programas como “científicos” también contribuyen a la desinformación científica. He visto a médicos que salen en la televisión como “especialistas en nutrición” demostrando un desconocimiento de lo más elemental del metabolismo, y diciendo disparates que hacen ruborizarse a nuestros alumnos de bioquímica, como confundir proteínas con vitaminas y enzimas con bacterias.

Algunas veces los periódicos intervienen en polémicas científicas que no están al alcance de sus lectores, como el caso sobre la teoría de la relatividad comentado arriba. Ciertos escritores y otros miembros del “mundo intelectual” atacan a la ciencia en todos sus frentes, hasta ridiculizando las obras científicas más trascendentales, como la de Darwin o la de Einstein, sencillamente porque no la comprenden, y a veces incluso pretenden apoyar su opinión con la de otros científicos, que también habrían demostrado tener muy poca cultura científica—y en particular muy poca cultura biológica. Con frecuencia se pueden leer en los periódicos barbaridades científicas que a un alumno universitario le costarían un suspenso en varias asignaturas. Y me refiero a opiniones expresadas en artículos de la sección de “cultura” de periódicos nacionales de gran tirada. ¿Cómo puede nuestra sociedad permitir e incluso alentar esta práctica?

Ciertos comentaristas de la prensa, radio y televisión, que intervienen en coloquios y escriben columnas o leen crónicas regularmente en los medios, con el marchamo de ‘intelectuales’ parecen tener *odio a la ciencia*. Ellos se basan en el axioma (por lo demás, ambiguo) de que “la ciencia tiene cosas malas”. Esto es el colmo del cinismo: atacar a la ciencia diciendo que es la culpable de muchos males. Existen las paradojas del progreso, pero eso no es algo de lo que la ciencia deba avergonzarse. También existen las paradojas de la

evolución biológica: por ejemplo, la selección natural ha producido el hombre, y éste lo primero que hace es a toda costa intentar neutralizar la selección natural, y hay varios ejemplos más de este tipo de paradojas. Desde luego, no vamos a negar que la ciencia ha creado armas terriblemente mortíferas. No me interesa la polémica de si es la ciencia o la tecnología la causante de eso. ¿Qué importa, y dónde está la diferencia?

Pero los que se quejan de esto, mantienen que tiene que haber una libertad de expresión absoluta y que la censura debe erradicarse por completo, aunque eso promueva muchos problemas sociales, tales como el tráfico de pornografía, prostitución infantil y otras lacras. Entonces, si se considera que la censura de las letras es aberrante, ¿por qué se defiende la censura de la ciencia?

Una cosa es la ciencia y otra el uso que luego haga la sociedad de lo que la ciencia descubre, lo cual queda fuera del control de los científicos. La ciencia tiene la obligación de descubrir las fuentes de energía ocultas en la Naturaleza, porque eso es lo que se espera de ella, y toda nuestra vida depende de esas fuentes de energía. En la edad de piedra se dependía exclusivamente de la energía del sol, del viento y de los ríos, pero entonces, una persona de 16 años era un anciano venerable con una esperanza de vida de un año. Si ahora se cerrasen todas las centrales nucleares de cualquier país de Europa no habría energía ni para llevar los alimentos a las ciudades, y habría muertes masivas por hambre y frío en pocas semanas.

El problema es que los científicos no controlan la opinión pública. ¿Por qué muchas polémicas sobre el orden y las prioridades sociales tienen que terminar en ataques a la ciencia excepto cuando se comprueban los progresos de la inmunología que hacen posibles los trasplantes, o cuando se descubre la vacuna de una enfermedad terrible?

El progreso de la ciencia ha salvado muchísimas más vidas que las que ha destruido. No hace falta insistir en esto, pero recordaré un dato: la vida media del hombre se ha duplicado dos veces a lo largo de la historia: hace diez mil años, con el desarrollo de la agricultura, la vida media pasó de 17 a 34 años (según datos muy precisos de la antropología arqueológica); después, en el siglo pasado, con Pasteur y Koch, al desarrollarse la defensa contra las enfermedades infecciosas, se volvió a duplicar a 68 años. Ahora está ya rondando los 80 años. Estos progresos fueron posibles gracias a la selección artificial, la bioquímica, la microbiología y otras partes de la biología y de la industria química. El descubrimiento de las vitaminas eliminó muchas enfermedades terribles típicas de la navegación, y se hizo posible combatir la desnutrición científicamente.

La desinformación científica se usa para manipular a la opinión pública. Unas veces se hace con una crítica ignorante de los hechos más probados de la ciencia, presentándolos como si fuesen meras conjeturas; otras, aceptando como hechos demostrados los que aún no lo están, según convenga a quien manipula la información. Hay muchos ejemplos, pero comentaré unos pocos.

(1) *Evolución y selección natural.*—La evolución biológica es un tema clásico de la desinformación. Parece imposible encontrar a alguien que entienda bien este tema, y sin embargo todos hablan de ello y desarrollan doctrinas y conjeturas pseudocientíficas y filosóficas. Me refiero en particular al papel del azar en la evolución, que desde luego ha sido el pun-

to que mayor controversia filosófica y científica ha desatado desde que Darwin formuló su teoría.

Podemos leer en muchos sitios (sin ir más lejos, hace unos pocos meses en un periódico nacional de gran tirada, sección de “cultura”, comentando los diez libros de más impacto en este siglo que acaba) que la ciencia moderna ha demostrado que la teoría de Darwin es incorrecta. Sin embargo, quienes afirman esto ni dan pruebas de que conozcan en qué consiste la teoría de Darwin, ni por supuesto hacen una crítica razonada del tema. Suelen decir que los matemáticos declaran que es absolutamente improbable que todo el producto de la evolución biológica se haya producido por azar. Ya estamos en uno de los errores más peligrosos de la incultura y de la desinformación científica: juzgar la validez de un descubrimiento científico porque sus resultados nos parezcan intuitivamente razonables, en lugar de analizar si el fenómeno en sí es consistente. No podemos decir que la selección natural sea imposible porque su resultado nos parezca demasiado grandioso. Debemos, en lugar de ello, estudiar bien en qué consiste, cómo funciona la selección natural, y juzgar su validez de acuerdo con eso, no porque nos parezca desproporcionado lo que sea capaz de producir.

Hoy sabemos que la selección natural es un algoritmo efficacísimo de búsqueda de soluciones optimizadas en un universo enorme de soluciones posibles; este procedimiento de optimización no funciona siempre, bajo cualquier circunstancia, sino únicamente cuando se cumplen estrictamente una serie de condiciones. Todas esas condiciones fueron enumeradas por Darwin. El funcionamiento de este mecanismo empieza con un tanteo previo, es decir probando sólo unas pocas de las muchísimas soluciones posibles, a partir de las cuales se desarrolla el algoritmo—no entraré ahora en los detalles de su funcionamiento, pero no es difícil de comprender. Véase, por ejemplo [21, 34-37]. Una de las condiciones del algoritmo es que el tanteo inicial en cada iteración debe ser una muestra generada al azar. Si eso no fuese así, si no hubiese esa intervención del azar es cuando jamás la vida podría haber dado los productos que conocemos.

Consideremos un ejemplo sencillo: el juego del parchís está basado en parte en un algoritmo que tiene un componente de azar: en cada vuelta, cada jugador tiene que tirar el dado antes de mover sus fichas. Cualquiera que vea una partida de parchís a medias, en una serie de fotos estáticas podría pensar que su transcurso es caótico, pues con el tiempo las fichas a veces se adelantan y a veces se retrasan, pero al final todo queda muy ordenado. El juego, sin el elemento de azar no tiene sentido. Ahora bien, ¿diríamos que los movimientos del universo, operando al azar han llevado las fichas desde los casilleros de salida hasta la meta, y además las han ordenado por colores? Entonces un matemático diría que es imposible que el azar haya producido eso en el poco tiempo que dura una partida. Y ¿a quién aprovecha esa discusión absurda? ¿No es preferible reservarse los juicios hasta conocer las reglas?

Varios insignes maestros que han escrito sobre teoría de la ciencia, como Russell, Popper o Cajal se han mostrado muy escépticos sobre el funcionamiento de la selección natural, o han pretendido demostrar que es imposible, cuando en realidad lo único que

han demostrado es que no la conocen. No es de extrañar, pues, que estas opiniones trasciendan a los periodistas. Popper afirma [16, p. 228]:

“No pienso que el darwinismo pueda explicar el origen de la vida. Pienso que es bastante posible que la vida sea algo tan sumamente improbable que nada pueda explicar por qué se originó; porque la explicación estadística debe operar en última instancia con probabilidades muy altas. Pero si nuestras probabilidades altas son meramente probabilidades bajas que se han convertido en altas a causa de la inmensidad del tiempo disponible . . . entonces, de este modo es posible explicar “casi” todo”.

Vemos que también Popper tiene dificultades para comprender el papel del azar en la evolución, pues él olvida que por muy largos que parezcan los millones de años, no es un tiempo infinito como para hacer probable lo improbable, teniendo en cuenta la frecuencia de mutaciones y el período reproductor de cada especie. Realmente la evolución ha sido muy rápida y no habría sido posible si no hubiese contado con el algoritmo de búsqueda rápida que Darwin llamó *selección natural*. En realidad la evolución ha sido mucho más rápida que lo que muchos se imaginan. La diversificación que originó los esquemas básicos de organización animal (insectos, arañas, cangrejos, moluscos, vertebrados, etc) se produjo en muy poco tiempo, pues hace unos 520 millones de años se había producido casi toda la biodiversidad básica actual, como lo demuestra la fauna del registro fósil del Cámbrico medio en Burgess Shale (Columbia británica, Canadá) [38].

Cajal también declara no estar muy convencido de la selección natural [5, p. 22]:

“Hoy creo menos en el poder de la selección natural que hace treinta años. Cuanto más estudio la organización del ojo de vertebrados a invertebrados, menos comprendo las causas de su maravillosa y exquisitamente adaptada organización.”

Rusell también demuestra no tener ideas claras al respecto [6, p. 46-49]:

Darwin trajo un montón de pruebas a favor de la evolución e inventó un cierto mecanismo que llamó “selección natural” para dar razón de la evolución. Muchas de sus pruebas sobre la evolución siguen siendo válidas; pero la selección natural está menos en boga entre los biólogos de lo que lo estuvo.”

Ninguno de estos tres grandes pensadores comprendió el mecanismo de la selección natural, lo cual es, en cierto sentido, disculpable, ya que su mecanismo no es nada obvio y sólo se ha demostrado del todo recientemente, pero serían mejor que no hubiesen opinado de lo que no comprendían. Sin embargo, Darwin la formuló correctamente desde el principio (aun careciendo de pruebas), demostrando tener mucha más intuición que todos los críticos que le siguieron. De todas formas, hoy que ya se conoce bien, toda esta polémica debería haberse erradicado, pero no es así. Sin embargo, en la misma época de las críticas apuntadas arriba, Schrödinger sí advirtió que la esencia de la selección natural es realmente un algoritmo de búsqueda que en cada iteración requiere producir una muestra al azar, pero donde el azar es simplemente el punto de partida, de forma que el resultado de cada selección condiciona el espacio de búsqueda para la siguiente (aunque siempre permanece una cierta posibilidad de reexplorar lo que se ha descartado). Así, en su obra *Mente y materia* [39, p. 29] escribe demostrando tener una gran intuición:

“En realidad, creo que sólo el primer inicio “en cierta dirección” tiene una estructura así (elección al azar) y éste da lugar a circunstancias que “moldean el material plástico”—por selección

cada vez más sistemáticamente en la dirección de las ventajas ganadas al comienzo. Metafóricamente podría decirse: las especies han averiguado en qué dirección se encuentran sus oportunidades para la vida y siguen esa trayectoria.”

Lo único que puede añadirse para demostrar en dos palabras al gran público que el mecanismo de la selección natural funciona, es que su fundamento teórico se utiliza industrialmente para encontrar soluciones optimizadas de fenómenos y procesos complejos, desde redes de distribución hasta diseños de aeronáutica [40].

(2). *El cambio climático.*—El segundo ejemplo es el supuesto cambio climático (que más bien deberían llamar “catastrofismo climático”). Ahí se mezclan muchas cosas, como el efecto invernadero, el supuesto aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO_2) y el aumento global de temperatura en nuestro planeta. No deseo entrar en demasiados detalles, pero éstos pueden encontrarse en la bibliografía citada más abajo. Baste aclarar un par de cosas: El efecto invernadero moderado hace posible la vida pues gracias a ello la temperatura de la Tierra no es gélida. En la actualidad, la concentración de CO_2 en nuestra atmósfera es tan baja que está prácticamente en el límite de lo que las plantas pueden soportar. Si bajase algo más, lo más probable es que la mayoría de las especies vegetales se extinguiesen. En los primeros tiempos de la historia de la vida la concentración de CO_2 era mucho mayor que la actual. En el Cretácico (hace unos 80 millones de años) se estima que sería entre 5 y 10 veces mayor que la actual (es decir, entre el 500% y el 1000%) [41, 42] y sin embargo, en esas condiciones, mucho más drásticas que el leve aumento del 15% que se pretende observar ahora, la vida no estuvo en peligro, al contrario, en esas condiciones se produjo el desarrollo de dos grupos importantísimos en la biodiversidad: los insectos y los mamíferos. El descenso drástico en la concentración de CO_2 que ha ocurrido desde el Cretácico unido al aumento de oxígeno, como consecuencia de la fotosíntesis, provocó una crisis en la vida vegetal, poniendo la fotosíntesis en condiciones muy precarias, ya que la mayoría de las plantas tienen grandes dificultades para fijar el CO_2 en las condiciones actuales, y muchas podrían estar en peligro de extinción. En la actualidad se estima que la concentración de CO_2 atmosférico tan baja merma la actividad fotosintética de la mayoría de las plantas en un 50%. Un aumento en la concentración atmosférica de CO_2 sería muy bueno para la preservación de la vida vegetal. Por otra parte la vida vegetal es un amortiguador magnífico de la concentración de CO_2 , pues en esa concentración tan baja, la actividad fotosintética de las plantas es prácticamente lineal con la concentración de CO_2 , de manera que un aumento de CO_2 produciría un aumento proporcional en la actividad de la fotosíntesis, lo cual neutralizaría ese aumento. Este efecto ya se ha observado.

La temperatura en la Tierra está aumentando, pero no porque la actividad industrial del hombre produzca CO_2 , sino porque desde hace unos 20.000 años (mucho antes del comienzo de nuestra era de industrialización, mucho antes de que se empezasen a explotar los combustibles fósiles) se ha iniciado una era interglacial, dentro de los ciclos habituales calor-frío que duran 100.000 años cada uno, y que están bien documentados en el registro geológico de la historia de la Tierra desde hace 850.000 años [43, pp. 74-78]. En esos ciclos la temperatura media del globo es unos 12°C en los periodos glaciares y cerca de 16°C en los interglaciales. La temperatura del globo ha aumentado unos 3°C durante

los últimos 20.000 años. Este aumento ha sido lineal con el tiempo, y no hay constancia de un aumento extra en los años recientes de la industrialización. Esos cambios de temperatura pueden provocar, por supuesto cambios en la cantidad del agua libre en los océanos y de la retenida como hielo en los polos, como ha ocurrido siempre en las eras interglaciares. El aumento de temperatura, al aumentar el deshielo podría elevar el nivel del mar lo suficiente como para que se inunden algunas tierras bajas. Puede ser lícito, pues, preocuparse ante esa posibilidad y deben tomarse las medidas pertinentes. La humanidad debería ser más cauta al administrar las zonas urbanas y no edificar grandes núcleos de población cerca de lo que antes o después pueden ser centros de catástrofes naturales, sean éstas mareas, terremotos, aguas de arrollada, volcanes, tornados, etc, sin tomar las debidas precauciones. Lo que no tiene sentido, y es grave desinformación científica es reñirle a uno todos los días porque por usar su coche puede ser responsable de una inundación. El efecto mariposa existe, pero como no puede demostrarse en cada caso, no se puede usar para justificar una mala política territorial.

No creo que sea necesario aclarar que no estoy diciendo con esto que la contaminación de la tierra, del mar y de la atmósfera no sea un problema muy preocupante. La actividad industrial descontrolada estropea el medio ambiente en muchos aspectos y causa estragos en la Tierra y en su atmósfera. Deben tomarse precauciones serias con el uso de los combustibles fósiles, y hay que reconvertir toda la industria química en una *química fina*, que no produzca residuos, pero todo esto debe defenderse con argumentos científicos, que los hay y muy poderosos, no haciendo demagogia con argumentos pseudocientíficos. No debilitemos los hechos científicamente probados tratando de añadirles más apoyo con argumentos falsos, pues eso los debilita.

(3) *El crecimiento demográfico*.—El crecimiento de la población en nuestro planeta Tierra es otro tema clásico de desinformación. Y este tema sería el más ridículo si no fuese el más trágico. El problema en pocas palabras es que el crecimiento demográfico global está amenazando seriamente con la extinción masiva de la vida en la Tierra (no sólo la de la especie humana), sin entrar en detalles de lo cruenta y violenta que puede ser esa extinción. Éste es un peligro mucho más grave que otros como la guerra nuclear, y una fuente de otros problemas que pueden conducir a lo mismo, como la contaminación de la tierra, el mar y la atmósfera, o como la violencia social. La descripción simple y descarnada del fenómeno está muy bien expuesta en una colección de tres artículos escritos por Isaac Asimov y publicados en el libro *La mente errabunda* [44]: “La buena Tierra está muriendo” [pp. 93-103]; “El precio de la supervivencia” [pp. 104-112]; y “Carta a un niño recién nacido” [pp.113-116]. Este libro de Asimov es en mi opinión la mejor colección de artículos que se ha escrito sobre divulgación científica práctica, es decir, sobre la información científica básica que todo el mundo debería tener, y una respuesta contundente a muchos temas típicos de desinformación científica que uno se encuentra con frecuencia.

Ciertos países desarrollados tienen un índice de crecimiento de cero, o incluso negativo. Entonces, algunos políticos se espantan ante la perspectiva de que nuestra sociedad se convierta pronto en una sociedad de viejos donde podría haber más individuos dependiendo de pensiones de jubilación que trabajadores activos. Esta preocupación es absurda,

y los que piensan así demuestran carecer por completo de visión de futuro y de una mínima mentalidad lógica, ¿Vamos a promover siempre el crecimiento de la humanidad? ¿Hasta qué límite? Puesto que el crecimiento de la población no puede crecer indefinidamente, es obvio que habrá que parar en algún momento; entonces, ese día tendrá que generalizarse la situación que ahora espanta a ciertos gobernantes, pero el problema será más grave cuanto más se tarde en abordar. La única cuestión es si empezamos ya a detener ese crecimiento y lo hacemos de forma incruenta, o esperamos unos cuantos años, cuando sea mucho más grave y nadie pueda garantizar que se haga pacíficamente. Pero sea ahora o más tarde, cuando vaya a hacerse, durante una o dos generaciones habrá un aumento importante de ancianos en la población. ¿Y qué? Si la solución de un problema requiere una situación incómoda, esto no se va a evitar retrasándola.

Sin embargo, existe y se mantiene una doctrina política de combatir el crecimiento negativo, originada por la incultura científica de esos gobernantes, y por su falta de mente lógica. Por fortuna, parece que la población hace poco caso de esas recomendaciones, y el problema del crecimiento demográfico podría resolverse solo. Es alentador ver un caso en el que la gente no se deja manipular; de todas formas, una insistencia de los políticos, incluyendo premios a la natalidad aún puede hacer mucho daño. ¿De qué sirve que los gobiernos promulguen leyes ecológicas para proteger el ambiente, si al mismo tiempo alienan el mayor problema ecológico de nuestro planeta?

* * *

La desinformación científica llega hasta la propia morada de la ciencia. Es demasiado frecuente que libros de texto de cualquier materia y de cualquier nivel tengan errores y omisiones importantes. Esto desorienta a los estudiantes, pues al advertir un contrasentido lo último que piensan es que sea el autor y no ellos quien esté equivocado, y en definitiva retrasa y obstaculiza la transmisión de la ciencia. Estos errores no siempre son corregidos por los profesores, porque algunos están tan sutilmente ocultos que hay que ser un experto para descubrirlos, y un profesor no puede ser un experto en todas las lecciones de su libro. Por esto, muchas revistas científicas tienen secciones fijas dedicadas a revelar y corregir esos errores, pero no es suficiente.

En general, donde más errores tienen los libros de texto es al explicar las teorías, es decir, en lo que no es una mera presentación de datos empíricos. Muchas teorías científicas están tan mal explicadas en los libros de texto que uno tiene que llegar a la conclusión de que el autor de ese libro no la entiende (es increíble que alguien puede intentar transmitir lo que no sabe). Quizá esto es así porque una teoría compleja y llena de conceptos fundamentales es considerada por el autor como una cuestión trivial que no merece preocuparse más por ella.

No es fácil encontrar textos donde las teorías más importantes como la teoría cinético-molecular de los gases, la mecánica cuántica, el modelo de Michaelis-Menten, o los modelos de alosterismo estén bien explicadas. El átomo de Bohr, (un desarrollo erróneo de la mecánica cuántica—equivalente a la concepción creacionista de Cuvier, la herencia de los caracteres adquiridos de Lamarck, o el establecimiento de los *paquidermos* como grupo zoológico monofilético) figura prácticamente en todos los libros de química general, como

si fuera una parte de la ciencia tan firmemente establecido como la termodinámica. El átomo de Bohr debería ser eliminado de todos los libros de texto, pues su desarrollo está basado en principios contradictorios, opuestos a la mecánica cuántica. Que se hable de esto como parte negativa de la historia de la ciencia puede no ser malo, como se habla de otros errores, pero el problema es que muchos autores que incluyen el átomo de Bohr en sus libros lo hacen como si éste fuese parte de la doctrina de la Química actual.

Las matemáticas tienen un papel clave en la enseñanza y práctica de las ciencias, como herramienta científica universal. Se dice que cada ciencia se caracteriza por tener una metodología propia; esto es cierto sólo en parte. Es cierto sólo en la mitad empírica de cada ciencia. Al contrario, en la mitad de la abstracción, todas las ciencias utilizan la misma metodología: las matemáticas. Las matemáticas no son—como se dice mucho y equivocadamente—un lenguaje. Hay lenguaje en ellas, como hay lenguaje en todo, pero las matemáticas son realmente una herramienta y todo un sistema para organizar y desarrollar la parte abstracta de la ciencia. Las matemáticas son pues la mitad de cualquier ciencia. Las matemáticas son la forma de ordenar y procesar los datos empíricos, las reglas y mecanismos de la abstracción que debemos hacer con ellos—o al menos lo que tiene de técnica esa abstracción (dejo una parte a la capacidad artística de cada uno), y las operaciones pertinentes para procesar esa información y deducir las predicciones teóricas con las que luego volveremos al laboratorio. ¿Puede, pues, alguien imaginarse una ciencia sin matemáticas? Entonces, ¿qué clase de ciencia se está enseñando cuando se le da publicidad a una asignatura, a un texto, e incluso a toda una carrera con el señuelo de que no tiene matemáticas? Aquí la desinformación se convierte en la cultura del terror científico.

La desinformación está generalizada en la enseñanza del método. He insistido mucho en que la ciencia se identifica con su método, pero, por lo general, los libros de texto, los profesores en clase, y muchos textos de divulgación, presentan la ciencia como una colección de conclusiones omitiendo detalles sobre los métodos que se han usado para llegar a ellas. Casi todos los textos empiezan con un capítulo de métodos; esto es algo marginal que los alumnos no suelen leer, pues donde hacen falta los métodos no es ahí, separados de sus resultados, sino en cada capítulo, para recordar siempre que un dato no significa absolutamente nada si no se especifica cómo se ha conseguido. La ciencia es una disciplina de métodos antes que de resultados.

La desinformación científica, contribuye a que se extiendan los conceptos erróneos y su influencia llega hasta los referees de las revistas y entorpece el desarrollo de la ciencia; en la mayor parte de los casos, por desgracia, cuando un referee no entiende un artículo lo rechaza.

La desinformación llega casi al punto de crear una ciencia paralela de conceptos erróneos, una ciencia fáctica que puede influir en la evaluación de proyectos, becas, plazas de profesores o investigadores, etc. La desinformación científica tiende su influencia hasta las decisiones políticas que pueden determinar la definición de áreas prioritarias, y otros movimientos masivos de recursos. Combatir este problema es labor y obligación de todos. ¿Cómo hacerlo? De momento no se me ocurre otra solución que ser muy respetuosos con la ciencia y con su método. Ante todo, adoptando la costumbre de explicar los métodos al

mismo tiempo que los resultados, manteniendo abierto el debate científico, reconociendo siempre que la ciencia es un camino más que un final.

Problema nº8.—La incultura científica.

¿Se puede sobrevivir en nuestra sociedad sin tener una mínima cultura científica? La respuesta es no, en absoluto. La pregunta entonces es: ¿cuál es esa mínima cultura? ¿Tiene el ciudadano medio ese mínimo?

Este problema es diferente del que acabamos de ver. La desinformación es un problema local; se produce cuando la ciencia se transmite mal o se da una opinión o información errónea. Y el culpable es el que maneja esa información. La incultura científica es un estado de pobreza educativa cuyas causas son mucho más complejas. El responsable puede ser el que la tiene, por pereza, por no molestarse en estudiar; el gobernante, por no haber planificado bien el estudio; o el educador, por no haberle orientado bien; la sociedad, en general, porque le ha engañado haciéndole creer que no necesitaba saber algo que es esencial para la supervivencia.

Esto no debería ser un problema. Una sociedad que debe mucho de su progreso a la ciencia debería reconocer que la cultura científica es absolutamente necesaria, y debería tener todo esto previsto en sus programas de enseñanza, de forma que la cultura científica fuese algo habitual en todos los ciudadanos.

Pero no es así. La cultura científica es rara, incluso en personas ilustradas, con estudios, incluso con títulos universitarios. También puede comprobarse, por desgracia, la escasa cultura científica de algunos gobernantes y otros personajes influyentes en las decisiones políticas, algunos de los cuales no tienen reparo en declarar públicamente que consultan a adivinos antes de tomar una decisión. Y muchos científicos no están exentos del problema; un científico que no se cultive, en cuanto se sale de su especialidad puede tener carencias graves en temas generales de ciencia.

El conocimiento básico de algunas ciencias es más necesario para la supervivencia en el mundo de hoy. Todas las ciencias se usan a diario, pero en algunas, nuestro conocimiento puede mejorar mucho su uso. La biología merece una atención especial ya que su uso correcto puede mejorar mucho nuestra vida; esto incluye aspectos muy diversos: la confección del menú cada día, tomar decisiones sobre los anticonceptivos, el tipo de ejercicio que se debe hacer, etc. La biología resulta ser una necesidad para la supervivencia. Y debemos insistir en las matemáticas, cuyo uso cotidiano es una necesidad universal.

La necesidad del conocimiento científico no es, pues, un tema de polémica; no puede ser motivo de discusión si es bueno o no, si es necesario o no, o si hay otras alternativas. El conocimiento científico, y su posterior aplicación para desarrollar la tecnología, es clave en el progreso de la humanidad y ha contribuido decisivamente al bienestar social, mucho más que las doctrinas filosóficas. Como señala Asimov [44], la esclavitud se acabó no porque la condenasen las doctrinas filosóficas o religiosas, sino porque el desarrollo de las máquinas de vapor la hicieron poco rentable. Quizá esto parezca espeluznante, pero al mismo tiempo que nos recuerda cómo son los instintos humanos, también nos demuestra

que a la ciencia, más que a nada le debemos la libertad que ha ido consiguiendo el ser humano a lo largo de la historia. La historia de la humanidad es la conquista progresiva de la libertad y el combate del sufrimiento; y el desarrollo científico ha sido lo que más ha ayudado ha conseguirlo.

La cultura científica es, en general, la parte menos cultivada de la cultura, la cual suele considerarse como un espacio reservado a “las letras”. El resultado es que la cultura científica es un bien tan escaso como necesario en nuestra sociedad. Es muy desalentador comprobar la falta de cultura científica que tiene la gente, que sin embargo tiene una cultura respetable en otros campos.

La incultura científica llega a alcanzar incluso a científicos importantes cuando escriben textos de divulgación saliéndose un poco de su especialidad. A veces da la impresión de que el campo donde menos cuidado parecen tener todos y menos les importa cometer errores — es decir, el campo en el que hay más incultura entre científicos de otras especialidades — es la biología; tengo muchos ejemplos, a cuál más lamentable, pero no citaré ahora ninguno.

Hay que tener una cultura científica mínima para comprender el estado de muchos problemas importantes del mundo actual, como el crecimiento demográfico, la influencia del tabaco en el cáncer, la contaminación del medio ambiente, el SIDA... La actualidad está llena de noticias científicas o que al menos tienen una relación con la ciencia y hay que tener un mínimo de cultura científica para poder entenderlas, valorarlas y no dejarse manipular, pues la manipulación de la información en cualquier terreno es una de las prácticas más comunes en nuestros días. Por ejemplo, los alimentos modificados genéticamente abren un mundo insospechado en la nutrición, pero las masas actúan con ellos como un rebaño siguiendo las instrucciones de cualquier comentarista que escribe tonterías en un periódico o que opina sin saber nada en un programa de televisión. Recordemos simplemente que la patata, el tomate, la naranja, el trigo, etc — todos los vegetales cultivados, sin excepción — son producto de una mejora genética similar a las que hay ahora aunque más imperfecta, más costosa, más lenta, y en suma, más cara, por lo cual cada producto logrado así estuvo mucho tiempo sólo a disposición de las clases más pudientes. Si nos asustan los alimentos modificados genéticamente deberíamos coger un arco y flechas y salir al monte a cazar fieras salvajes para comer, o escarbar la tierra con un cuchillo de piedra para buscar plantas silvestres esperando tener suerte para que no sean venenosas. En todo esto hay dos problemas: la desinformación que comentábamos antes, y la falta de cultura científica; quien carezca de ésta es un elemento fácilmente manipulable.

La ciencia no es un lujo intelectual sino una dimensión de la vida humana, una forma de conocimiento que refleja los niveles y posibilidades de un país y que afecta a la calidad de vida de sus habitantes. Los gobiernos de los pueblos tienen la obligación de promover la difusión de la ciencia y de generalizar la educación científica. Privarle a un niño de una educación científica — admitir esa opción educativa — es dejarle inhabilitado para la mayor parte de las posibilidades profesionales y de supervivencia para el futuro, y privarle de un criterio para expresar una opinión libre ante los cambios cada vez más profundos que se producen en nuestra sociedad.

Por último — y quizá lo más importante — la educación científica desarrolla una mentalidad racional y hace al que la tiene ser independiente de temores supersticiosos, es decir, más libre.

Por todo ello hay que combatir la incultura científica. Hay que promover la educación, la práctica y el desarrollo de la ciencia y pienso que esta corporación que hoy nos reúne puede ser uno de los mejores sitios para promover ese desarrollo de la cultura científica.

Problema nº9.— La mala política científica

Voy a distinguir tres tipos de problemas relacionados con la administración política de los recursos que dedican los gobiernos a la investigación. Ahora analizaré los problemas de planificación, es decir, los obstáculos que tiene que superar un investigador para conseguir que se financie su proyecto; en la sección siguiente, los problemas que se derivan de la mala administración de los recursos que dedican los gobiernos a la investigación científica, y por último, los obstáculos burocráticos que se le ponen al investigador para el desarrollo del proyecto.

Casi todos los problemas derivados de una mala política científica consisten en dirigir equivocadamente el quehacer científico. La política científica es necesaria, por supuesto, porque la dotación de los recursos del estado a la ciencia debe ser administrada con inteligencia, pero hacerlo bien es muy difícil. Por eso deseo empezar reconociendo que el origen de los problemas que voy a comentar está probablemente en buenas intenciones, y que eso ha generado problemas por desconocimiento y mal asesoramiento.

Debemos empezar reconociendo que los gobiernos no suelen tomar decisiones sobre política científica sin consultar a un equipo de asesores científicos. El problema es complicado porque los buenos científicos suelen ser reacios a pertenecer a comisiones políticas ya que les irrita el tiempo que se pierde allí. Los políticos deben ser exquisitamente cuidadosos al elegir sus asesores científicos; deben tratar el camino difícil: buscar a los buenos científicos, que suelen estar escondidos en su trabajo, convencerles a que se integren en su equipo, organizar las cosas para no quitarles demasiado tiempo, y hacer que su labor sea grata y fácil, no otra carrera de obstáculos para aburrir a las mentes activas. Los políticos tienen que evitar que los malos científicos se infiltren en sus equipos por más que se hagan de notar en las reuniones sociales.

(a) **Áreas prioritarias.**—Quiero separar las áreas prioritarias de las modas, porque aunque muchas veces coinciden, son dos conceptos diferentes. Este es un tema complicado. ¿Debe haber áreas prioritarias? ¿En todos los campos, o sólo en algunos? ¿Qué porcentaje de recursos debería ser asignado a esas áreas? ¿Cómo se determina cuáles deben ser esas áreas, y quién lo hace?. Son todas decisiones muy difíciles, pues es fácil que esas áreas acaben convirtiéndose en vías fáciles de favor que fomenten el oportunismo de los malos científicos. Por otra parte, no es fácil que logren su objetivo pues raramente consiguen que los buenos científicos se desvíen hacia ellas. En general, no es ése el camino para desarrollar la ciencia, o al menos no puede organizarse una política científica creando masivamente mu-

chas áreas prioritarias, o incluso, como se hace cada vez más, transformando toda la actuación en áreas prioritarias.

La ciencia sólo puede progresar de una forma: atacando las preguntas que existen en las fronteras del conocimiento. Las áreas prioritarias pueden ser muy necesarias socialmente, pero desde el punto de vista científico muy pocas veces son acertadas. Muchas veces la ciencia no está en condiciones de abordar los problemas que los políticos desearían que se resolviesen bajo su mandato. Fijar áreas prioritarias a los científicos es como querer ponerle puertas al campo o barricadas a un huracán: un buen científico que está en la frontera del conocimiento de su especialidad, metido de lleno en un problema interesante, con un prestigio mundial por haber hecho avanzar a la ciencia en ese campo, no se distraerá de su labor por ofrecerle el señuelo de un área prioritaria con mucho dinero; y si a la postre el político que le ofrece la tentación, como la manzana de Eva, consigue atraerle abusando de su necesidad, le habrá quitado a la ciencia un buen científico.

El dinero que dedica un gobierno a la Investigación científica debe ser administrado con el máximo respeto a la ciencia. Sin embargo, ajenos a todo esto, los políticos fomentan cada vez más las áreas prioritarias, y es de esperar que en un futuro muy próximo sólo haya fondos para estas áreas. Estas áreas lo invaden todo: subvenciones, becas, programas de enseñanza, etc. Hoy que la ciencia puede avanzar con rigor, la política científica se dedica a destruirla con el pretexto de unos intereses sociales, y amparada en el capricho o la ignorancia de algunos responsables políticos. Los únicos que están capacitados para decidir qué debe investigarse, y qué no, son los especialistas en cada rama de la ciencia. Tomemos a un buen científico que haya demostrado su valía y démosle medios; respetemos su sabiduría, de la misma forma que a un buen escritor no le pedimos que cante, ni a un buen médico se nos ocurre ofrecerle dinero si se dedica a matar toros.

Un hecho que los políticos deberían tener en cuenta al establecer los criterios de la política científica es el desarrollo desigual de la ciencia en cada rama. En realidad, esto no debería ser un problema, es un hecho lógico y natural. El problema es que eso no se suele tener en cuenta en los programas de política científica, y con frecuencia se da mucho dinero para áreas que no pueden justificar ese gasto, y no se les da a otras cuyo desarrollo lo merece y lo necesita. Todas las áreas deben promoverse, unas porque hay que desarrollarlas, y otras porque ya tienen mucho que dar, pero los recursos que se dedican a cada una deben estar en concordancia con el grado de desarrollo que tienen, no con el que desearían los políticos que tuviesen porque algunas sean más populares que otras en un momento dado. Se dice que el mejor árbitro de un partido de fútbol es el que pasa desapercibido, porque los protagonistas en el campo son los jugadores. El político que tiene a su cargo la política científica debería actuar así.

Se llega a tener una cierta sensación de ridículo cuando se leen las áreas prioritarias publicadas en los diarios oficiales. Sirvan como ejemplo los programas de la Unión Europea en la convocatoria de 1996 (que no mencionaré ahora). Sólo hay áreas prioritarias, y la ciencia ha sido sustituida por fantasías y caprichos de alguien que no sabe cómo administrar los enormes recursos que tiene. Y lo peor es que sólo es posible conseguir fondos para

temas de esos. Los temas libres, como fueron antes los programas *Science*, o *Life*, ya no existen. La Unión Europea tampoco puede estar contenta de su política científica.

¿Hemos de recurrir otra vez al oportunismo y la picaresca? ¿Hemos de correr como locos buscando esas subvenciones, porque no se pueden dejar pasar oportunidades para conseguir fondos, disfrazando nuestra investigación?

(b) **Planificación local.**—**Nacionalismos en la ciencia.**—La separación política del estado español en comunidades autónomas y la transferencia de las competencias de educación ha llevado innecesariamente a un problema que se hace muy preocupante: dirigir cada vez más recursos de la investigación a cuestiones de interés local y menos a problemas de interés general.

Este tipo de acciones está entre un punto de egoísmo (“hemos de favorecer la ciencia que interese a nuestra región”) y una especie de complejo o de inferioridad o reconocimiento de limitaciones (“aquí no podemos competir con los grandes núcleos de investigación mundial en los grandes problemas de la ciencia”). No sé cuál de los dos límites es más inconveniente.

Este es otro problema enojoso que está muy relacionado con el de la ciencia creativa anotado arriba, así que de nuevo me limitaré a presentarlo descarnadamente sin analizarlo muy a fondo.

La ciencia creativa no se puede programar. Si tenemos la suerte de contar en nuestra región con un investigador o un grupo que la hace, es obligación del gobierno de ese país o de esa comunidad autónoma apoyarlo, porque igual que la ciencia es un patrimonio mundial, de libre uso para todos, su desarrollo también es responsabilidad de todos, y un investigador con ideas creativas puede aparecer en cualquier sitio, no necesariamente en esos centros tan potentes que producen ciencia al peso. ¿Cuál es, si no, la alternativa? ¿Que por culpa de una torpe acción de gobierno no se desarrolle una idea que podría promover un gran impulso en el conocimiento mundial? ¿Qué alternativa tiene ese investigador si no le subvencionan su proyecto: emigrar a otro sitio donde pueda llevarlo a cabo y arrastrar con él a toda su familia en esa loca aventura? ¿Cuál es el límite de sacrificio que un investigador está moralmente autorizado a pedir a su familia? ¿Y a qué región o a qué país hay que emigrar si se generaliza esta práctica? ¿En qué hemos avanzado, entonces, desde hace un siglo, cuando la “fuga de cerebros” era una práctica generalizada? Un gobernante que no sea capaz de reconocer que en su ámbito, por muy local que sea, tiene un valor de alcance mundial es como un maestro incapaz de reconocer un genio excusándose en que su pueblo es muy pequeño y está muy lejos de Nueva York; ese gobernante no sería digno de ocupar el cargo. Los gobernantes deben revisar sus planes de política científica, para ser capaces de detectar estos casos, y actuar en consecuencia cuando se presenten.

(c) **Asociaciones peligrosas.**—La política científica se está haciendo excesivamente dirigista sobre la organización interna de los grupos de investigación. Desde hace unos años la última moda es aconsejar o forzar la colaboración entre grupos, que supuestamente podrían estar interesados en problemas similares.

Yo quiero protestar enérgicamente contra este tipo de política. La investigación científica, tal como la entiendo y la practico, es una actividad esencialmente creativa y cuyo éxito y trayectoria depende de la imaginación de una persona, o varias asociadas espontánea-

mente; de una idea y de la forma de desarrollarla, todo muy personal. Desde luego que puede haber otros grupos interesados, pero eso sólo no les da garantías para que comparemos con ellos nuestras ideas.

Quiero reivindicar el derecho a la propiedad intelectual, y el derecho a compartir nuestras ideas con quienes deseemos. Supeditar la concesión de una subvención a admitir a ciertos grupos como colaboradores (sin que luego quede muy claro quién es el que va a mandar en esa asociación) es sencillamente una forma de coacción y hurto intelectual. ¿Qué ideas aportarán esos colaboradores impuestos? No se nos diga que la ciencia es una actividad absolutamente altruísta y que las ideas no tienen dueño, que lo importante es que la ciencia progrese. Las ideas se publican y son del dominio público, pero se publican con un nombre. El único pago que pide el científico es que se reconozca cuál ha sido su aportación personal en el desarrollo de la ciencia. El científico no vende sus ideas a una empresa para ganar dinero, las publica y a veces tiene incluso que pagar dinero para publicarlas, y siempre tiene que gastar mucho de su propio dinero y de su tiempo libre en estudiar para comprender los problemas. ¿Es ético forzarle a que ceda sus ideas si quiere tener una oportunidad para desarrollarlas?

Este problema es otra muestra de la incapacidad de la administración—y de su grupo de asesores científicos, no lo olvidemos—de reconocer la ciencia creativa. Permitidme un ejemplo disparatado: Imaginemos que en los años 30 un ministro español de cultura hubiese dicho: “Picasso y Dalí deberían unirse y trabajar en colaboración porque es demasiado lujo permitirnos dos grupos, porque aunando esfuerzos el producto tendrá más calidad y pintarán más cuadros” (por cierto, ¿acaso se mide la calidad de un pintor en el número de cuadros que ha pintado?). Sólo puede medirse en cantidad la ciencia que no descubre cosas.

Me contestará alguien que no se puede comparar una creación artística con la actividad científica, porque la primera es una cuestión muy personal y la segunda es labor de un equipo complejo. Bien, esto quizá valga para la ciencia no creativa (aunque también lo dudo), pero el hecho de tener un equipo de colaboradores no hace que el producto sea no creativo. El cine, por ejemplo requiere un equipo más grande que un grupo de investigación científica. Además, por muy grande que sea el equipo, el producto será malo si no hay una buena idea para desarrollar, y un artista organizando su desarrollo.

La culminación de este tipo de política aberrante son los proyectos de la Unión Europea. La condición absoluta *sine qua non* para poder acceder al reparto de la enorme cantidad de medios que se administran allí es que uno tiene que asociarse con grupos de otros países de Europa.

He empezado esta colección de problemas reivindicando la necesidad de que los científicos de especialidades distintas deben asociarse para abordar los grandes problemas de la ciencia de hoy, pero éste no es el camino. Varios científicos distintos deben asociarse en un grupo, para interactuar a diario, no la unión de grupos ya hechos, cada uno con sus problemas. Buscar a otra persona para casarse con ella suele ser bueno, o al menos debe intentarse, pero asociarse varias parejas con el mismo objeto no suele dar buen resultado.

Veo una cosa en el fondo que me produce cierta tristeza. Es triste que en nuestra época se pretenda menospreciar la labor personal en todo. Parece que no existen las personas, parece que las ideas no valen. Hay una tendencia a admitir que cualquier idea, por original que sea, siempre se le habría ocurrido a otro.

Problema nº10.—La mala administración de los recursos.

En otros tiempos se podría decir que no había recursos para la investigación científica. Eso no sirve hoy. Hoy hay recursos pero no están bien administrados. Aquí me refiero a problemas cotidianos pero muy preocupantes. A diferencia de los del apartado anterior, creo que éstos tienen una solución muy fácil, de manera que dependen simplemente de la voluntad política.

(a) **Escasez de becas.**—Este es uno de los problemas más graves de la investigación en España en la actualidad. Casi diríamos que su causa es estúpida, su daño es inmenso y no se ve la forma de que se resuelva, porque los políticos están demostrando persistentemente su insensibilidad a este problema. El problema no es complicado, y se puede hacer un análisis rápido: Pensemos en una universidad española de tamaño medio, como la de La Laguna, con 20.000 alumnos. Cada año terminan la carrera un diez por ciento (2.000 alumnos). De ellos, un buen porcentaje desean continuar en la universidad para conseguir el doctorado, el más alto grado académico. Pongamos que esto lo desee un 25% (500 alumnos). Supongamos que hacemos una selección muy fuerte y lo reducimos a un 10%. Son 200 alumnos. Esa universidad necesita 200 becarios cada año para cubrir unas necesidades mínimas de supervivencia. Sin embargo, en las condiciones actuales, esa universidad recibe menos de 20. ¿Cómo podemos aceptar esta situación? Un alumno de doctorado tiene que ser un becario, porque es un profesional que está en período de mejorar su formación. ¿Para qué hacemos tantos programas de doctorado (que no son nada baratos, por cierto) si luego no estamos dispuestos a dotarlos de alumnos que los disfruten? Luego es irónico que se hagan leyes regulando el número mínimo de alumnos de doctorado que puede tener un curso de doctorado.

En Estados Unidos hay universidades privadas y estatales que no tienen programas de doctorado, pero en España no es así. ¿Por qué se hace que todas las universidades en España tengan programas de doctorado si luego no se dan los medios para desarrollarlos?

Los becarios son necesarios para la investigación por muchas razones diferentes: no puede concebirse la investigación sin becarios, porque la transmisión del conocimiento, la creación de una escuela es inherente a la labor científica de un investigador; un becario no es simplemente mano de obra fácil en un proyecto de investigación, pues un becario exige una dedicación muy especial del director de la tesis para enseñarle a diario. Pero el becario es quien puede estar muchas horas en el laboratorio sin interrupción, sin ocuparse de labores burocráticas, sin reuniones para mil y un motivos, y es quien más rendimiento puede sacarle a la costosa instalación del laboratorio. ¿Para qué queremos tanta parafernalia de aparatos e instalaciones si los medios para usarlas son tan precarios? ¿A qué viene esta restricción en nuestra labor investigadora que contradice todo el esfuerzo anterior?

El problema no tiene mucho sentido porque su solución no es cara. El presupuesto destinado a becarios se renueva cada año; las becas tienen una duración limitada, de cuatro años, de manera que esto no es una bola de nieve que crezca sin fin. Durante esos años el becario se organiza su vida futura y su profesión, de forma que al acabarse la beca ha tenido tiempo para determinar la especialidad que le gusta y el tipo de orientación profesional que quiere darle a sus conocimientos. Ya no tiene edad de becario y deja su plaza a otro. El problema laboral del becario que acaba es diferente y podríamos discutirlo, pero esa discusión no debe ser el pretexto para no dar becas, pues de la misma forma, podría serlo también para no crear licenciados.

Podemos ir más a fondo estudiando este problema. Parece ser que entre los gobernantes circula la creencia de que en España hay muchos doctores y por esa razón no son muy proclives a dar becas. ¿Hay de verdad muchos doctores?

Irlanda y Holanda son países productores de científicos, muchos de los cuales emigran a Estados Unidos al terminar su formación. Esta es una práctica habitual en esos países, que nosotros no vamos ahora a valorar; pero sus gobiernos no se han replanteado una política reductora de becas aduciendo que hay demasiados doctores; muchos buenos doctores se quedan en su país, porque la mayoría prefiere quedarse en su sitio si puede, y el resultado es que esto aumenta la calidad científica de esos países.

Hace unos doce años, una compañía inglesa compró una participación mayoritaria de la empresa química española Explosivos de Riotinto, y una de sus primeras medidas fue dismantelar su departamento de investigación porque la compañía inglesa tenía ya uno en Dublín. Parece que el destino de los españoles en Europa va a ser fregar los suelos de los laboratorios; si nos conformamos con esto, entonces es cierto que no hacen falta doctores. Un licenciado fregando el suelo sufre menos que un doctor; pero si miramos la revista inglesa *Biochemical Journal*, la revista de Bioquímica de índice de impacto más alto de Europa, vemos que uno de los países que más producción científica tiene hoy en bioquímica es España. ¿Por qué nos empeñamos en destruir la actividad científica española privándola de los becarios, que son su mayor potencial productivo y la garantía del futuro, ahora que por primera vez en la historia España se está convirtiendo en un país científico?

La política de becas del gobierno no es acertada. Hay muchas becas para estudiar cosas sin mucho fundamento, simplemente basándose en el principio de que en esos campos hay pocos doctores. ¿Hacen falta muchos doctores en pintura? ¿Es más artista un doctor que un pintor que no lo es? Caemos de nuevo en la idea de que la ciencia es un lujo cultural que hay que repartir como se espolvorea un condimento encima de un plato. Entonces yo haré una paráfrasis del verso del poeta español Gabriel Celaya (1911-1991): "maldigo la poesía concebida como un lujo cultural por los neutrales" para aplicarlo a la ciencia, y también del título que diría: "La ciencia es un arma cargada de futuro".

La ley manda que los becarios del plan estatal deben estar asociados a un proyecto, y cada investigador principal sólo puede tener a su cargo un becario. En realidad esto es otra forma de justificar la escasez de becas. A ningún gobernante le espanta que uno pueda tener varios cientos de alumnos en las aulas. Entonces ¿por qué han legislado que uno sólo puede tener un estudiante de doctorado en su laboratorio?

Más injusta es aún, si cabe, la práctica según la cual los *departamentos* que no tienen becarios tienen prioridad para recibirlos. Entonces los sitios donde nadie quiere ir porque tienen poco que enseñar (desgraciadamente existen) tienen prioridad. Y un buen estudiante debe elegir uno de esos sitios. Hay que empezar recordando que la división de una universidad en departamentos es una división administrativa en cuyas ventajas e inconvenientes no quiero entrar ahora, pero no tiene suficiente base real como para organizar la política científica a partir de ahí. ¿Cómo se ha podido hacer una ley que hace que la agrupación de profesores perjudique su actividad investigadora y las de sus discípulos? Si el grupo de investigación de la puerta de al lado (cuyo trabajo es tan independiente del nuestro a todos los efectos como cualquier otro de otra facultad, otra universidad u otro país) tiene ya un becario, eso nos perjudica a nosotros. ¿Acaso estamos recibiendo algo de ese becario vecino para que se nos penalice? Y lo que es quizá la mayor de las injusticias: ¿Qué culpa tiene de ello un buen estudiante que quiere formarse trabajando con nosotros? ¿Para quién es la igualdad de oportunidades?

Yo creo otra vez que todo esto son simplemente pretextos para ocultar la escasez de becas, pero en este punto, es seguro que esas disposiciones no resistirían un recurso al tribunal constitucional. Los gobernantes deberían tomar nota de esto. Es muy grave. En cualquier caso, todos estos problemas se derivan de uno solo: el reparto de miseria nunca puede hacerse con justicia. He mencionado muchos problemas en este discurso, algunos gravísimos, pero si tuviese en mi mano resolver uno sólo elegiría éste sin dudarlo. Y afirmo esto sin acaloramientos, pues ya se ha visto que este problema ha sido una referencia continua en este discurso. Sin becarios la investigación es imposible porque ni se puede hacer ciencia ni se puede transmitir la antorcha. ¿Cómo es posible que el problema que hace más daño sea uno de los más fáciles de resolver?

(b) **Escasez de personal auxiliar.**—Por lo general, salvo en casos contadísimos, un investigador tiene que organizar sus tareas sin contar personal auxiliar en absoluto. El laberinto burocrático que tiene que soportar y resolver un investigador en España es muchas veces más complicado que el problema científico con que se encuentra en el laboratorio.

Nunca la universidad ha tenido tanto personal de administración y servicios, y nunca el investigador universitario ha estado tan desasistido. Un investigador no tiene una secretaria, ni un técnico de laboratorio, y tiene que dedicar mucho tiempo a trabajos que podría hacer perfectamente un personal menos cualificado. ¿Cómo puede permitirse una administración que su personal más cualificado dedique tantas horas a escribir cartas, contestar oficios y pedir productos a las casas comerciales, por no hablar de fregar los tubos de ensayo? Este es otro problema incomprensible. La investigación genera unas necesidades de personal auxiliar tan grandes que con frecuencia anulan muchísima de la actividad del investigador principal de un proyecto, y parte de la de su grupo. Quizá se piensa que no interesa resolver este problema porque sería ruinoso dotar de ese personal a *todos* los investigadores cuando sólo una minoría los necesita realmente. Pero es mala forma de gobernar no resolver los problemas necesarios por no saberlos separar de los innecesarios. ¿Hay voluntad política en el Ministerio o en el Gobierno de la universidad para arreglar estos problemas?

Problema nº11.—La Burocracia

Consideraré la burocracia en un sentido muy amplio. No sólo los requisitos de trámite, sino todo el conjunto de normas legales que rigen el desarrollo de un proyecto de investigación y la relación formal del investigador con la administración del Estado.

La burocracia es un montón de problemas que llegan a aburrir al investigador. Desde mi punto de vista todos son problemas estúpidos e inútiles por artificiales, que demuestran una vez más la incapacidad de la administración para reconocer la buena ciencia, y la persistencia del espíritu de la picaresca, según el cual la administración no es una organización al servicio del ciudadano, sino un entramado para inventar obstáculos a fin de que el estado se defienda contra el ciudadano el cual se supone que siempre intenta robarle.

(a) **La evaluación del *curriculum*.**—Un investigador está obligado a presentar su *curriculum* varias veces al año, por diversos motivos, por lo que su cuidadosa puesta al día—adaptándolo a diversos formatos—le lleva muchas horas. Todos reconocemos que esta práctica, aunque incómoda, es necesaria, pues al fin y al cabo es el único rendimiento de cuentas formal que se le pide periódicamente a un investigador. Sin embargo, la manera de juzgar el *curriculum* es un problema grave. En general lo que cuenta es el número de publicaciones al peso, y las grandes ideas que hacen de verdad avanzar la ciencia y que gastan muchos años de reflexión no están justamente valoradas. Quizá esto se debe a la falta de costumbre. No abundan las grandes ideas entre tanta producción. Un bien muy escaso no tiene un sitio reservado cuando llega. Tampoco es fácil evaluar una buena aportación hasta que el paso de los años lo ha demostrado.

Si preguntamos a alguien (a quien todo el mundo considere un buen científico) por su labor investigadora, lo más probable es que nos responda con frases como "tengo más de cien artículos publicados en tales revistas" que "he descubierto tal o cual propiedad de la Naturaleza". Esto probablemente se debe a que desde luego es mucho más fácil publicar un artículo en una revista, por muy alto que sea su nivel de impacto, que hacer un auténtico descubrimiento científico que tenga una repercusión relevante.

Como ocurre siempre con las costumbres de masas, este proceder se ha hecho norma fija de conducta y ley por arriba y por abajo: nos evalúan más por el peso de nuestros artículos (quiero decir el "peso físico", en sentido literal, no el significado científico) que por la relevancia de nuestros descubrimientos; el peso del papel (ponderado por su índice de impacto, lo que no cambia demasiado las cosas) es el que determina nuestro baremo; por él nos evalúan y nos dan más o menos gratificaciones en nuestro sueldo, por él nos seleccionan para evaluar a otros, por lo mismo nos dan más o menos medios para investigar.

Los tramos de investigación que nos evalúan voluntariamente son una consecuencia de esto. Se hicieron pensando en premiar la labor de investigación, y su dedicación a ella, para diferenciar al universitario investigador que dedica todo el tiempo que le queda libre después de las clases a la investigación, del otro que dedica ese tiempo a pasar una consulta o un bufete, o simplemente a pasear y charlar. La idea no es mala, desde luego, pero su aplicación dista mucho de ser justa, y el resultado es muy diferente de lo que se pretendió. Al distribirse todo por especialistas y especialidades caemos otra vez en la injusticia de

que a cada uno se le mide por un rasero diferente. Por ejemplo, un bioquímico, tiene que batirse en un forum de los más altos de España, donde tener menos de dos o tres artículos publicados en revistas extranjeras de índice de impacto moderado, tirando a bueno, cada año significa haber hecho muy poco, mientras que hay especialidades en que se han concedido tres tramos sin tener ni un solo artículo publicado en una revista de alcance internacional.

A todo esto podría quizá objetarse que los artículos son evaluados por especialistas y que su calidad está certificada por el índice de impacto de la revista que lo publica, pero esto cambia muy poco lo dicho, y otra vez hemos caído en una rutina de la que no se ve forma de salir: hay muchos artículos publicados en *Nature*, *Science*, *Cell*, o *PNAS*, que no han tenido ninguna repercusión, y otros, en cambio, publicados en revistas con un índice de impacto más bajo que han marcado un hito en el desarrollo de la ciencia. El ejemplo más típico es, desde luego, la publicación original del ciclo de Krebs (rechazada por *Nature*), pero no es un caso aislado. Por desgracia hay muchos ejemplos como ese en la historia de la ciencia.

Para hacer grandes descubrimientos un investigador necesita tiempo, y la necesidad de un exceso de publicaciones es un importantísimo ladrón del tiempo, que no debemos consentir. El único comentario que merece toda esta historia es la paráfrasis de la expresión de Shakespeare "palabras, palabras, palabras". Para nuestra desgracia, la mayor parte de lo que hoy llamamos resultados científicos no son otra cosa que papeles, papeles, papeles.

(b) Normas burocráticas de los proyectos de investigación.—La estructura de los proyectos y las normas de las entidades estatales que subvencionan la investigación tienen requisitos burocráticos absurdos. Señalaré algunos ejemplos, para dar una idea del problema. En muchos programas de investigación se advierte que *no se puede usar el dinero del proyecto para comprar ordenadores*. ¿Acaso hay algún instrumento científico que funcione hoy sin un ordenador? (en realidad, ¿hay algún científico que funcione sin un ordenador?). *No se pueden comprar muebles*. ¿Qué pasa si uno necesita una mesa auxiliar para poner un aparato, o una cámara fotográfica, o si uno necesita una estantería para colocar revistas? ¿no es todo eso parte de la investigación? *No se puede dedicar el dinero a suscripciones de revistas periódicas*. ¿Y si uno no tiene otras fuentes de financiación, cómo compra las revistas? ¿No compra revistas? ¿A qué viene ponerle tantos inconvenientes a un investigador? ¿Es que no hay ya suficientes dificultades en la propia búsqueda de la verdad científica?

La gestión de los fondos es un problema, porque aún en muchos casos, los órganos de administración, incluyendo la intervención del Estado, parecen ser dispositivos destinados a poner dificultades, cuando deberían ser para facilitar el trabajo de los ciudadanos. Los requisitos legales para comprar un aparato o contratar un servicio son tan complicados que cada gasto es un problema.

En España un investigador no tiene una asignación fija de gastos de investigación, y depende de los fondos de su proyecto de investigación hasta para llamar por teléfono. En cualquier universidad de un país civilizado (Estados Unidos, Francia, Alemania, Inglaterra) esto no es así. A cada investigador se le evalúa su producción cada año, o cada dos años y en función de eso se le asigna una cantidad (que suele ser bastante alta, por cierto)

para los gastos corrientes de su laboratorio, aparte de los proyectos específicos que tenga. En algunas universidades como la Humboldt de Berlín, esta asignación incluye un número fijo de becarios, que deben ser renovados cada cinco años. ¿Cuándo los Gobiernos se tomarán en serio el desarrollo científico de España?

Aunque parezca increíble, está regulado por ley que un investigador no puede dedicar más de 40 horas semanales a la investigación (¡si en la playa o en la montaña, en un día de asueto, uno sigue pensando en un problema está violando la ley!). Un profesor de universidad, como tiene que dedicar ciertas horas a la docencia, no puede dedicar más de 32 horas semanales. El número total de horas dividido por 40, da el número de "equivalentes de jornada completa" (EJC's). En general, cuantos más EJC's tenga un proyecto, más dinero puede recibir, pues se supone que más tiempo se le va a dedicar. Dentro de lo aberrante del planteamiento, esto no parece excesivamente malo en principio, pues parece como un control del tiempo de dedicación de cada miembro del equipo, pero en realidad funciona como otra trampa para sabotear la actividad de los buenos investigadores, y así detener el avance de la buena ciencia. Un buen investigador necesita que su proyecto se dote bien, y según la ley esto sólo puede asegurarlo si figura en él con muchas horas. En realidad, ciertas normas fácticas le obligan a tener todas sus horas dedicadas a ese proyecto. Eso ya le inhabilita para cualquier otro. Se supone que esto es una forma de controlar la dedicación, ya que el tiempo es finito, ¿pero es que no hay una forma más racional y más justa de hacerlo? No es justo ni rentable limitar la capacidad investigadora de un buen científico basándose en una medida irreal. ¿Cómo puede decidirse la capacidad investigadora de alguien midiéndola sólo en tiempo? Según esa ley la calidad científica de un investigador no puede superar 32 horas semanales y esa medida es la misma para todos, por más que uno haya demostrado que sabe aprovechar el tiempo mucho más que otros, pues una hora de un buen científico no es el mismo tiempo que una hora de un mal científico. Este problema es tan inútil que tiene muchas soluciones obvias, por eso no insistiré más.

Pretender medir la calidad de un proyecto por el número de horas de dedicación es la mejor forma de reconocer la incapacidad de controlar el valor de la ciencia que se produce; es admitir que no hay ciencia creativa y que toda la actividad científica es labor de rutina. Los proyectos europeos no tienen EJC's. Uno se compromete a un trabajo y lo hace. El que lo encarga y lo paga no anda preguntando el tiempo que tiene libre, ni qué otros compromisos tiene. El requisito de los EJC's en los programas nacionales y autonómicos está fomentando uniones artificiales entre personas que no tienen un interés investigador común. Otra vez habrá que acudir a la picaresca disfrazándose para sobrevivir a los obstáculos burocráticos. Un investigador pierde mucho tiempo en todas esas prácticas.

Problema nº12.—La labor docente del investigador

Este último problema debería ser el comienzo de otro trabajo: *Los problemas de la enseñanza*. Yo soy un apasionado de la enseñanza, y mis alumnos dirán si digo verdad. Ya he comentado arriba que las obligaciones del investigador científico no acaban cuando se publican los resultados, sino que también es su deber transmitir y divulgar la ciencia. Ahora deseo entrar en la otra cara del problema: la *necesidad* que tiene un investigador de enseñar si

quiere hacer buena ciencia. Me refiero a que la docencia beneficia — y mucho — al que la da, no sólo al que la recibe. Antes decía que es obligatorio para el que crea ciencia transmitirla; ahora quiero declarar que es imposible crear ciencia sin transmitirla.

La docencia no sólo sirve para comprender bien un tema, sin cuyo entendimiento global poco podríamos investigar en él; sirve ante todo para producir nuevas ideas. Algunos investigadores piensan que la docencia les distrae de su investigación, pues la mayor parte de la materia que han de abordar está muy lejos del problema concreto que les ocupa. Quien piensa así está muy equivocado. Es muy importante para un investigador tener la obligación de repasar la asignatura completa todos los años, en lugar de quedarse en el lugar cómodo del campo reducido de su tema de investigación. Esta práctica es una disciplina mental muy necesaria para muchos aspectos de nuestra actividad, pues es prácticamente la única oportunidad que tenemos de no perder de vista las cuestiones básicas de la ciencia.

Hay quien piensa que la ciencia básica ya no tiene problemas y que por tanto repasarla es inútil (también hay quien dice que la música tonal ya no tiene nada nuevo que aportar desde Mozart; pero después de Mozart aparecieron Beethoven, Verdi y los Beatles). Habría que recordarles a éstos que toda la ciencia está basada en axiomas como los dos principios de la termodinámica, la ley de Planck o el principio de De Broglie, que son propiedades de la Naturaleza, aparentemente generales pero cuya causa desconocemos. De manera que debemos seguir buscando su explicación. Por otra parte, todas estas propiedades encierran conceptos que son difíciles de entender y que por eso uno tiene que reflexionar mucho sobre ellos.

El conocimiento bien asentado de estos conceptos básicos es muy fecundo. Muchas ideas nuevas sobre problemas más particulares sólo pueden venir cuando uno tiene muy clara la base. El investigador es pues el primer beneficiario de la docencia. Este ejercicio renueva, mantiene fresco el conocimiento básico, y es fuente permanente de ideas nuevas.

La actividad docente no sólo nos beneficia porque nos obliga a mantener y ampliar nuestros conocimientos básicos. El momento de la transmisión es el más crítico en la reflexión personal del científico, y quien crea ciencia y no la transmite pierde esa posibilidad. Sherlock Holmes demuestra conocer esto muy bien cuando le dice a su amigo Watson [9]:

“Al menos me he familiarizado con los hechos esenciales. Voy a enumerárselos porque no hay nada que clarifique tanto un caso como el explicarlo a otra persona”

Creo que todos podemos reconocer que muchas veces en el momento de explicar una lección hemos visto más claro el problema. Hablo por experiencia propia. Ciertos resultados llamativos de nuestra investigación como *El juego de las pentosas* que han abierto nuevas líneas han surgido de esa forma. Varias veces me han preguntado: “¿y cómo se te ocurrió esto?” Terrible pregunta que pocas veces puede uno contestar. Pero en este punto no hay duda: “Un día en clase, al explicar esa lección”.

Creo que así dejo clara mi absoluta convicción de que un investigador debe dedicar una parte importante de su tiempo, y de sí mismo a la docencia, y he querido hacer un reconocimiento público de todo lo que le debo a mi actividad cotidiana en clase. Pero una vez

aclarado esto, hablemos de un problema: ¿cuánto tiempo debe dedicar un investigador a esta práctica?

Debemos aclarar ya qué modelo de universidad queremos tener: ¿La universidad es un centro de investigación, en donde además cada profesor transmite la ciencia de su especialidad a sus alumnos, o es una academia de enseñanza terciaria en donde a una serie de profesores estudiosos de alguna materia en particular, se les permiten unas veleidades investigadoras en sus ratos libres?

Es inseparable la docencia de la investigación en un buen científico, pero la dedicación a la docencia no debe medirse en horas sino en profundidad y rigor. En la universidad, uno sólo debe enseñar la materia de la que es especialista, y durante un tiempo tal que no le perturbe de su actividad investigadora. En nuestras universidades la excesiva dedicación a la docencia que se les exige a los profesores es uno de los principales obstáculos del avance científico.

Pero un buen investigador también está haciendo docencia cuando investiga. ¿Acaso atender y enseñar el método de la ciencia, el manejo de técnicas complicadas, la redacción de artículos y la lectura crítica, a los doctorandos, no es docencia? ¿Qué diríamos de una universidad en donde un premio Nobel no pudiera atender a sus estudiantes de doctorado que están ahí para aprender a ser científicos, ni pudiese ir a dar conferencias a otras universidades, porque tuviese dos o tres horas de clase todos los días, y tuviese que rellenar las horas de docencia de su cupo, en el laboratorio de prácticas enseñando a los alumnos primer curso a manejar una pipeta? Si eso nos parece una aberración, ¿dónde ponemos el límite? Y si se nos dice: "es que aquí no tenemos premios Nobel", entonces contestaremos: "de esa forma va a ser difícil tenerlos". No creo necesario explicar por qué una universidad debe estar interesada en tener científicos de una calidad reconocida internacionalmente.

* * *

Ahora no deseo escribir una colección de doce soluciones. Pretendo que el esquema estético de *Los problemas* sea un discurso que quede abierto para que cuando yo acabe, el lector o el oyente discuta de los problemas, no de las soluciones que yo pueda proponer, pues para proponer una buena solución primero hay que entender muy bien el problema, y creo que esa primera labor es suficiente por el momento.

* * *

Quiero terminar volviendo a lo que planteaba al principio, sobre la actitud científica en la vida. Y me gustaría hacerlo con una reflexión. En muchas universidades y centros de todo tipo, en Estados Unidos, desde Institutos de enseñanza hasta comercios, he visto colgado en la pared un letrero que dice:

"Aquí no discriminamos a nadie por su nacionalidad, por su color, por sus tendencias políticas, por sus creencias religiosas, por su origen histórico, o por su idioma".

Bello mensaje. ¡Qué alentador es que su exhibición esté tan extendida! Me propuse enseñarla exhibirlo en mi laboratorio. Sin embargo, después de pensarlo bien lo he puesto, sí, pero he añadido esta puntualización:

“Pero si usted es fanático de una tendencia política, una religión, una etnia, un idioma, un pasado histórico, o cualquier otro aspecto de la cultura,

Entonces no podemos aceptarle.

Porque al trabajar en este laboratorio usted puede descubrir resultados que contradigan sus creencias, y como fanático de ellas usted tratará de no creer o incluso ocultar esos resultados.

La ciencia es la actividad de búsqueda de la verdad, lo que significa admitir que ésta no se conoce de antemano, y uno debe estar preparado para aceptarla, sea cual sea, y dispuesto a cambiar sus creencias si se demuestra que no son correctas.”

Acabo ya. Quiero agradecerles de nuevo la oportunidad que me dáis para contribuir al desarrollo de la ciencia desde este foro que deseo que sea representativo de la ciencia que se hace en Canarias, y que esté continuamente exigiéndose y superándose, como todo el mundo espera que lo haga la ciencia. Porque la gente tendrá una mentalidad más o menos científica, tendrá una cultura científica mayor o menor, tendrá una idea más o menos ajustada de lo que es la ciencia... Pero todos sin excepción saben — aunque algunos no quieran reconocerlo — que la ciencia es lo único que puede librarles de sus sufrimientos, y es nuestra responsabilidad mantener la ilusión de que las condiciones de vida podrán ser mejores para todos en el futuro.

Bibliografía citada, y notas

1. Véase un ensayo muy interesante sobre el conocimiento progresivo de la investigación científica en: Asimov, I. (1988) *The relativity of wrong*. Nightfall Inc., New York. [Trad. esp. *La relatividad del error*. Planeta, Barcelona, 1989].
2. Véase un resumen sobre los métodos de trabajo en paleontología en: Meléndez, B. (1978) *Métodos y resultados de la investigación paleontológica*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid.
3. Krebs, H. A. (1979) Acerca de cómo formularse preguntas adecuadas en la investigación biológica. Conferencia inaugural del XVIII Congreso Nacional de la Sociedad Española de Ciencias Fisiológicas. Valencia.
4. Russell, B. (1911) *Problems of Philosophy*. Oxford University Press. [Trad. esp: *Los problemas de la filosofía*. Labor, Barcelona, 1991].
5. Ramón y Cajal, S. (1941) *Los tónicos de la voluntad*. Espasa Calpe (col. Austral), Madrid, 1963.
6. Russell, B. (1931) *The scientific outlook*. George Allen & Unwin, London. [Trad. esp: *La perspectiva científica*, Sarpe, Madrid, 1983].
7. William James: fisiólogo, psicólogo y filósofo americano que desarrolló la doctrina del pragmatismo científico en los últimos decenios del siglo XIX y en el primero del XX. Una de sus obras más famosas es: *Pragmatismo: un nombre nuevo para viejas formas de pensar*. (1907). Citado en *Enciclopedia Microsoft Encarta*, Microsoft Corporation. 1998.
8. Albareda, J. M. (1951) *Consideraciones sobre la investigación científica*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, pp. 57-58.
9. Conan Doyle, A. (1892) *The memoirs of Sherlock Holmes.—The Adventure of Silver Blaze*. The Strand Magazine, Dec. London. [Trad. esp. *Las memorias de Sherlock Holmes.—Brillo de plata*. Editorial Fontamara, Barcelona, 1981].
10. Endhard, J. (1945) *Cuarteto para instrumentos de muerte*. (Trad. esp.) Librería Hachette, S.A., Buenos Aires, pp. 23-24.
11. Science Citation Index. A Bibliometric analysis of science journals in the ISI database. *Journal of Citation Reports* 1994-1996.

12. Ramón y Cajal, S. (1941) *Cuentos de vacaciones. —El pesimista corregido*, Espasa Calpe, (col. Austral), Madrid, 1964, pp. 152-206.
13. Popper, K. R. (1963) *Conjectures and refutations. The growth of scientific knowledge*. Routledge & Kegan Paul, London. [Trad. esp: *Conjeturas y refutaciones. El desarrollo del conocimiento científico*. Paidós, Barcelona, 1994].
14. Popper, K. R. (1934) *The logic of scientific discovery*. [Trad. esp. *La lógica de la investigación científica*. Tecnos, Madrid 1990].
15. Popper, K. R. (1972) *Objective knowledge*. [Trad. esp. *Conocimiento objetivo*. Tecnos, Madrid, 1988].
16. Popper, K. R. (1974) *Unended quest. An intellectual autobiography*. The library of living philosophers, La Salle, Illinois. [Trad. esp: *Búsqueda sin término. Una autobiografía intelectual*. Tecnos, Madrid, 1994].
17. Holland, J. H. (1971) Processing and processors for Schemata. En: *Associative information processing* (Jacks, E. L., ed). American Elsevier, New York, pp. 127-146.
18. Darwin, C. R. (1859). *On the origin of the species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. Henry Colburn, London. [Trad. esp: *El origen de las especies*. Espasa Calpe (col. Austral), Madrid, 1988].
19. Eigen, M., McCaskill, J. & Schuster, P. (1988) Molecular quasi-species. *Journal of Physical Chemistry* **92**, 6881-6891.
20. Eigen, M. (1993) Cuasiespecies víricas. *Investigación y Ciencia* **204** (sept.) 14-22.
21. Meléndez-Hevia, E. (1992) *La evolución del metabolismo: hacia la simplicidad*. Eudema, Madrid.
22. Meléndez-Hevia, E. (1990) The game of the pentose phosphate cycle: a mathematical approach to study the optimization in design of metabolic pathways during evolution. *Biomedica et Biochimica Acta* **49**, 903-916.
23. Meléndez-Hevia, E., Waddell, T. G. & Montero, F. (1994) Optimization of metabolism: the evolution of metabolic pathways toward simplicity through the game of the pentose phosphate cycle. *Journal of Theoretical Biology* **166**, 201-220.
24. Meléndez-Hevia, E., Waddell, T. G. & Cascante, M. (1996) The puzzle of the Krebs citric acid cycle: assembling the pieces of chemically feasible reactions, and opportunism in the design of metabolic pathways during evolution. *Journal of Molecular Evolution*, **43**, 293-303.
25. Heinrich, R., Montero, F., Klipp, E., Waddell, T. G. & Meléndez-Hevia, E. (1997) Theoretical approaches to the evolutionary optimization of glycolysis. Thermodynamic and kinetic constraints. *European Journal of Biochemistry* **243**, 191-201.
26. Meléndez-Hevia, E., Waddell, T. G., Heinrich & R., Montero, F. (1997) Theoretical approaches to the evolutionary optimization of glycolysis. Chemical analysis. *European Journal of Biochemistry* **244**, 527-543.
27. Meléndez-Hevia, E., Waddell, T. G. & Shelton, D. E. (1993) Optimization of molecular design in the evolution of metabolism: the glycogen molecule. *Biochemical Journal* **295**, 477-483.
28. Meléndez, R., Meléndez-Hevia, E. & Cascante, M. (1997). How did glycogen structure evolve to satisfy the requirement for rapid mobilization of glucose? A problem of physical constraints in structure building. *Journal of Molecular Evolution* **45**, 446-455.
29. Meléndez, R., Meléndez-Hevia, E., Mas, F., Mach, J. & Cascante, M. (1998) Physical constraints in the synthesis of glycogen that influence its structural homogeneity: a two-dimensional approach. *Biophysical Journal* **75**, 106-114.
30. Schrödinger, E. (1944) *What is life?* Cambridge University Press, Cambridge. [Trad. esp. *¿Qué es la vida?* Tusquets, Barcelona, 1983].
31. El interés que tienen los sistemas biológicos para físicos y químicos como una fuente inagotable de nuevos procesos y leyes de la Naturaleza es una idea constante en la obra de Illia Prigogine. Véase, por ejemplo la introducción de su libro: Nicolis, G. & Prigogine, I. (1977) *Self-Organization in nonequilibrium systems. From dissipative structures to order through fluctuations*. John Wiley & Sons, New York, pp. 19-21.
32. Mingote, A. (1973) *Historia del traje*, 2ª edic. Myr, Madrid, p. 7.
33. Asimov, I.—El corolario de Asimov. En "Luces en el cielo" (Trad. esp.). Edhasa, Barcelona, 1990.

34. Patterson, C. (1985) *Evolución. La teoría de Darwin hoy.* (Trad. esp.). Fontalba, Valencia.
35. Cairns-Smith, A. (1985) *Seven clues to the origin of life.* Cambridge University Press. [Trad. esp. *Siete pistas sobre el origen de la vida.* Alianza, Madrid, 1990].
36. Dawkins, R. (1986) *The blind watchmaker.* [Trad. esp. *El relojero ciego.* Labor, Barcelona, 1989].
37. Montero, F., Sanz Nuño, J. C. y Andrade, M. A. (1993) *Evolución prebiótica: El camino hacia la vida.* Eudema, Madrid.
38. Gould, S. J. (1989) *Wonderful life. The Burgess Shale and the nature of history.* W.W.Norton & Co., New York. (Trad. Esp. *La vida maravillosa,* Crítica (Grijalbo), Barcelona, 1991).
39. Schrödinger, E. (1958) *Mind and Matter.* Cambridge University Press, Cambridge. [Trad. esp. *Mente y materia.* Tusquets, Barcelona, 1985].
40. Holland, J. H. (1992) Algoritmos genéticos. *Investigación y Ciencia*, **192** (sept.) 38-45.
41. Ehleringer, J. R., Sage, R. F., Flanagan, L.B. y Pearcy, R. W. (1991) Climate change and the evolution of C₄ photosynthesis. *Trends in Ecology and Evolution*, **6**, 95-99.
42. Ehleringer, J. R. y Monson, R. K. (1993) *Annual Review of Ecological Systems*, **24**, 411-439.
43. Gribbin, J. (1990) Hothouse Earth. The greenhouse effect & Gaia. [Trad. esp. *El efecto invernadero y Gaia,* Pirámide, Madrid, 1991].
44. Asimov, I. (1983) *The roving mind.* [Trad. esp. *La mente errabunda.* Alianza, Madrid, 1987].